

DOI: 10.34031/article\_5ce292ca089623.21062637

<sup>1,\*</sup>Николюкин А.Н., <sup>1</sup>Ярцев В.П., <sup>1</sup>Коломникова И.И.<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет

Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112

\*E-mail: valax1@yandex.ru

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ СЦЕПЛЕНИЯ С БЕТОНОМ

**Аннотация.** Армированный бетон является одним из самых распространенных материалов в строительстве. Конструкции из данного материала обладают высокой несущей способностью, хорошо воспринимают динамические и статические нагрузки. Это обеспечивается за счет сцепления между арматурным стержнем и бетоном. Величина сцепления формируется из ряда различных факторов, образуемых в области условной поверхности взаимодействия арматуры с бетоном. Под условностью подразумевается то, что даже в случае использования любой арматуры происходит соприкосновение материалов по поверхности, которая может разрушаться в зависимости от нагрузки. Нарушение сцепления вызывает значительные деформации конструкции, что впоследствии ведет к потере несущей способности элемента. Поэтому возникает необходимость в изучении величины сцепления между бетоном и арматурой при различных воздействиях. В данной статье описаны результаты численного эксперимента испытания на выдергивание стеклопластиковой арматуры периодического профиля из бетона. Построена математическая модель, позволяющая изучить накопление дефектов и разрушение арматуры в области заделки в бетон. Рассмотрены результаты численных исследований.

**Ключевые слова:** бетон, стеклопластиковая арматура, сцепление, вырыв, математическая модель, разрушение.

**Введение.** Изучение процесса сцепления стержня с бетоном путем проведения исследований на выдергивание арматуры зависит от поставленных задач. Так, напряженно-деформированное состояние у образцов, применяемых при испытании на вырыв, во многом зависит от их форм и размеров. При этом наблюдается различное перераспределение напряжений между арматурой и бетоном [1].

С точки зрения теории, идеальным условием для проведения испытаний на выдергивание арматурных стержней из материала является отсутствие собственных напряжений в композите [2]. Однако, в практике подобный случай можно встретить крайне редко, поскольку при эксплуатации конструкций в материале наблюдается возникновение сжимающих или растягивающих усилий различной величины. С помощью данного метода становится возможным определение основных характеристик сцепления, например, радиуса активного взаимодействия, момента образования первых трещин, разрушения бетонной поверхности и др.

Овчинникова И.Г. [3] в своих исследованиях установила, что в результате испытаний на выдергивание арматуры из опертых на торец призм наблюдается образование сопоставимых между собой деформаций стержня в материале. При этом необходимо учитывать такой фактор как укорочение бетона по длине призмы, появление которого связано с действием реактивных сил.

Решение задач, связанных с проведением исследований на выдергивание арматуры из призм, уложенных в бетонном массиве, оказалось достаточно сложным. Это объясняется тем, что под влиянием окружающего массива наблюдается стремительное развитие деформаций образца и его разрушение.

К существенным недостаткам данного метода можно отнести большую трудоемкость работ и невозможность установить точный характер разрушения в области заделки, а также необходимость создания опор для опирания и закрепления устройств. Поэтому для решения данной проблемы произведен численный эксперимент в пакете ANSYS 19.0 Workbench.

**Методология.** Сцепление образцов стеклопластиковой арматуры с бетоном определялось с помощью испытания на вырыв из бетонных кубов с ребром 100 мм согласно ГОСТ 31938-2012. Все образцы твердели и набирали прочность в нормальных условиях (90 сут.,  $t=20\pm 2$  °C,  $w=65$  %). Длина заглубления образцов в бетон принималась равной  $l/d=5$  мм. Перемещение стержня относительно бетона фиксировалось индикатором с точностью до 0,001 мм, установленным на нагруженном конце стержня. Также для образцов В25 проведены испытания с циклами замораживания-оттаивания согласно ГОСТ 10060-2012 [4].

После проведения испытания на вырыв проводились визуальные исследования для установления характера разрушения и накопления дефектов у арматуры и бетона в области заделки.

Численное моделирование НДС в контактном слое в пакете ANSYS 19.0 Workbench про-

дидились на основе результатов механических испытаний арматуры и бетона согласно ГОСТ 31938-2012 [5], ГОСТ 24452-80 [6].

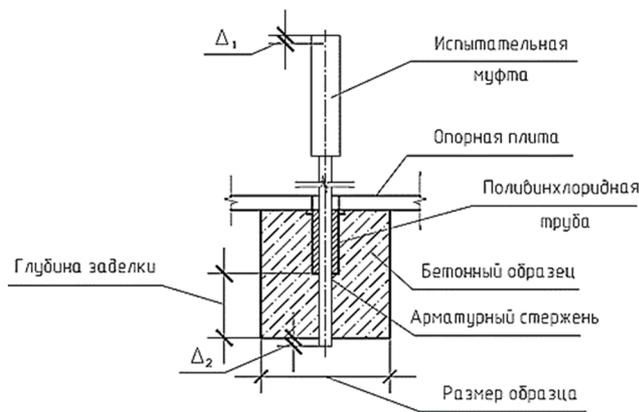


Рис. 1. Схема образца для испытания на выдергивание

**Модель.** Разработанная модель состоит из нелинейных материалов, поэтому для ее реализации требуется использовать аппарат вычислительной механики. На данный момент самым распространенным и удобным является МКЭ. Следует отметить возможность решения механики твердого деформирующего тела с учетом нелинейности работы материала. Поэтому метод конечных элементов получил широкое применение в современной практике проектирования, что в свою очередь положило начало разработки программных комплексов на его основе. Примером таких комплексов могут выступить ABAQUS, MARC, ANSYS и др.

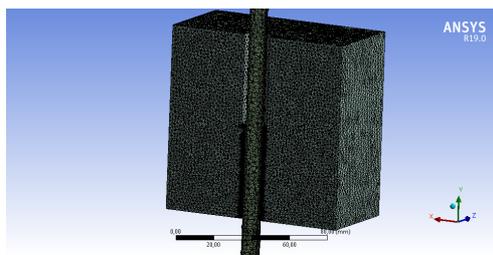


Рис. 2. Расчетная КЭ модель

В данной работе численное решение задачи сцепления композитного стержня с бетоном производилось на базе комплекса ANSYS 19.0 Workbench [7].

В качестве модели бетона принята модель Menetrey-Willam [8–10], основанная на поверхности пластичности Уиллама-Варнке, включающей зависимость от трех независимых инвариантов тензора напряжений.

Поверхность пластичности Уиллама-Варнке отличается от поверхности Мора-Кулона отсутствием острых краев, которые могут вызвать

трудности в решении поверхностного напряжения Мора-Кулона. Также она обладает некоторыми характеристиками, свойственными модели Drucker-Prager [8], и может моделировать аналогичные материалы. Модель Menetrey-Willam [9] лучше всего подходит для моделирования поведения связанных инертных материалов.

**Основная часть.**

Композитная арматура

При задании физико-механических характеристик СПА учитывается тот факт, что ролинг стержня по структуре является ортотропным материалом [7]. Для этого в качестве описания работы массива стеклопластиковой арматуры выполнялось использование модели материала Orthotropic Elasticity, которая базируется на формуле (1), но имеет разнообразную матрицу жесткости материала. Так как в плоскости СПА существует вторая плоскость симметрии, будет существовать и матрица жесткости, принимающая вид:

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\nu_{12} & -\nu_{31} & 0 & 0 & 0 \\ E_{11} & E_{11} & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12} & 1 & -\nu_{12} & 0 & 0 & 0 \\ E_{11} & E_{22} & E_{11} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{31} & -\nu_{22} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ E_{33} & E_{22} & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{12}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $E_{ij}$  – модуль упругости, соответствующий направлению материала;  $G_{ij}$  – модуль сдвига;  $\nu_{ij}$  – коэффициент Пуассона.

Прочность СПА при НДС может быть оценена различными критериями, которые непосредственно могут выявить вероятную схему или

механизм разрушения, например, указать, разрушение будет происходить по матрице или по волокну [11]. Поэтому каждому применённому критерию прочности можно присвоить коэффициент, который покажет приоритет в анализе разрушения материала. Так, например, при растяжении СПА более вероятно разрушение внешнего

волокна, поэтому критерию следует присвоить более высокий коэффициент прочности на разрушение волокна.

В пример можно привести применение коэффициентов весовых критериев максимальных напряжений:

$$f = \max \left( \left| w_1 \frac{\sigma_1}{X} \right|, \left| w_2 \frac{\sigma_2}{Y} \right|, \left| w_3 \frac{\sigma_3}{Z} \right|, \left| w_{12} \frac{\tau_{12}}{S} \right|, \left| w_{13} \frac{\tau_{13}}{R} \right|, \left| w_{23} \frac{\tau_{23}}{Q} \right| \right) \quad (2)$$

где  $w_1, w_2, w_3, w_{12}, w_{13}, w_{23}$  – весовые коэффициенты;  $X, Y, Z$  – предел прочности материала на одноосное растяжение или сжатие;  $R, S, Q$  – предел прочности материала на сдвиг.

критериям - на прочность и на деформацию (формулы 3 и 4):

$$f_f = \frac{\sigma_1}{X} = 1 \text{ если } \sigma_1 \geq 0$$

то  $X = X_t, \sigma_1 < 0$  то  $X = X_c$  (3)

$$f_m = \frac{\varepsilon_1}{X_\varepsilon} = 1 \text{ если } \sigma_1 \geq 0$$

то  $X_\varepsilon = X_{\varepsilon t}, \sigma_1 < 0$  то  $X_\varepsilon = X_{\varepsilon c}$  (4)

Если же разрушение наступает без предшествующих заметных деформаций волокна, то в качестве предельного состояния будет считаться разрушение по максимальным напряжениям [12].

Если рассматривать разрушение матрицы материала, то зависимость примет вид:

$$f_m = \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \left( \frac{\tau_{12}}{S} \right)^2 + \left( \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_2 \quad (5)$$

Как и во многих критериях, разрушением считается момент, когда относительная прочность достигает единицы. Поэтому функция принимает вид:

$$f_m = \max(f_f, f_m) \quad (6)$$

Межволоконное Разрушение СПА

Для описания межволоконного разрушения СПА был использован критерий А. Рукс, учитывающий два тензора напряжения ( $\sigma_2, \tau_{21}$ ), которые описывают разрушение в пространственной постановке задачи. Сам механизм разрушения в трехмерной форме можно описать следующими формулами:

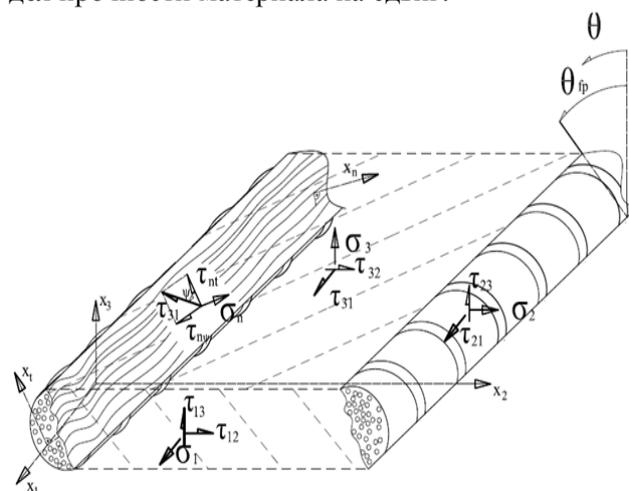


Рис. 3. Напряжения в параллельных волокнах основного стержня СПА

В данной работе критерием прочности выступает значение А. Рукс, так как оно в должной степени подходит для описания армированного композитного материала с учетом ряда важных факторов, таких как разрушение фибры арматуры, расслоение материала и межволоконное разрушение внутри материала.

Разрушение волокна СПА

Случай разрушения волокна внутри СПА описывается простым критерием А. Рукс, а оценка прочности материала происходит по 2

$$\sigma_n \geq 0 \text{ то } f_E = \sqrt{\left[ \left( \frac{1}{R_{\perp}^+} - \frac{p_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}^A} \right) \sigma_n \right]^2 + \left( \frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2} + \frac{p_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n \quad (7)$$

$$\sigma_n < 0 \text{ то } f_E = \sqrt{\left[ \left( \frac{p_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}^A} \right) \sigma_n \right]^2 + \left( \frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2} + \frac{p_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n \quad (8)$$

$$\cos^2 \psi = 1 - \sin^2 \psi = \frac{\tau_{nt}}{\tau_{nt}^2 + \tau_{n1}^2} \quad (9)$$

$$R_{\perp\perp}^A = \frac{R_{\perp}^-}{2(1+p_{\perp\perp}^-)} \quad (10)$$

Критерий прочности А. Рукс состоит из следующих параметров сопротивления разрушению (критерия разрушения):  $R_{\perp\parallel}^-, R_{\perp\parallel}^+, R_{\perp\perp}^-, R_{\perp\perp}^+$ ,

где  $R_{\perp}^+, R_{\perp}^-$  устанавливают точки пересечения кривой с осью  $\sigma$ , что соответствует разрушению;  $R_{\perp\parallel}^A$  устанавливает точку пересечения с

осью  $\tau_{12}$ ;  $R$  обозначает параметры сопротивления разрушению;  $p$  обозначает параметры наклона разрушения в последнем пресечении;  $\perp$  и  $\parallel$  обозначают перпендикулярность и параллельность волокну соответственно [11].

Из приведенных выше уравнений, функция критерия разрушения формируется в плоскости разлома (действия) с использованием соответствующих напряжений и деформаций. Формулировки напряжений  $\sigma_n$ ,  $\tau_{nt}$  и  $\tau_{n1}$  в произвольной плоскости с углом наклона  $\theta$  [11]:

$$\sigma_n = \sigma_2 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta + 2\tau_{23} \sin \theta \cos \theta \quad (11)$$

$$\tau_{nt} = (\sigma_3 - \sigma_2) \sin \theta \cos \theta + \tau_{23}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (12)$$

$$\tau_{n1} = \tau_{31} \sin \theta + \tau_{21} \cos \theta \quad (13)$$

Чтобы найти фактор воздействия стресса  $f_E$ , требуется установить угол  $\theta$ , так как разрушение

$$\frac{1}{f_w^{if}} \sqrt{\left[ \left( \frac{1}{R_{\perp}^+} - \frac{p_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}^A} \right) \sigma_n \right]^2 + \left( \frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2 + \frac{p_{\perp\psi}^+}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n} = 1 \quad \text{при } \sigma_n \geq 0 \quad (16)$$

$$\frac{1}{f_w^{if}} \sqrt{\left[ \left( \frac{p_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}^A} \right) \sigma_n \right]^2 + \left( \frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}^A} \right)^2 + \frac{p_{\perp\psi}^-}{R_{\perp\psi}^A} \sigma_n} = 1 \quad \text{при } \sigma_n < 0 \quad (17)$$

Режим активного отказа зависит от угла фракции  $\theta$  и знака  $\sigma_n$ . Расслоение может произойти в том случае, когда  $\sigma_n$  положительная и  $\theta$  составляет 90 градусов. Режимы разрушения, расслоения и скручивания волокон происходят с отрицательным  $\sigma_n$ .

Для слоев СПА выявлены следующие значения констант:  $p_{\perp\perp}^- = 0,18$ ;  $p_{\perp\perp}^+ = 0,18$ ;

$$p_{\perp\parallel}^- = 0,24$$
;  $p_{\perp\parallel}^+ = 0,285$

Влияние параллельных напряжений волокон на межволоконное разрушение

Учитывая, что некоторые волокна могут разрушиться уже при одноосных нагрузках, которые значительно меньше максимальных нагрузок,

$$q = \frac{s}{1+(a_{ellipse}c_{line})^2} + \sqrt{\left( \frac{s}{1+(a_{ellipse}c_{line})^2} \right)^2 - \frac{s^2 - a_{ellipse}^2}{1+(a_{ellipse}c_{line})^2}} \quad (20)$$

Впоследствии коэффициент силового воздействия принимает вид [11]:

$$f_{E0} = \frac{\left( \frac{|\sigma_1|}{X} \right)}{q_F}, \quad \text{при } \frac{|\sigma_1|}{f_{E0}} > sX \quad (21)$$

Контактное взаимодействие профиля СПА со стрежнем ривинга

Как было установлено ранее, первостепен-

ной причиной разрушения сцепления СПА с бетоном является отслоение профиля арматуры от основного стержня. Для моделирования данного процесса предлагается использовать модель связанной зоны – Cohesive zone model (CZM), в которой разрушения матрицы связующего рассматриваются как постепенное отделение поверхности профиля арматуры от основного стержня с

$$\frac{p_{\perp\perp}^-}{R_{\perp\perp}^A} = \frac{p_{\perp\parallel}^-}{R_{\perp\parallel}^A} \quad (14)$$

Что в дальнейшем приводит к функции вида:

$$f_E(\theta) = \begin{cases} \arccos\left(\sqrt{\frac{-R_{\perp\perp}^A}{-\sigma_2}}\right) & \text{если } \sigma_2 < -R_{\perp\perp}^A \\ 0 & \text{если } \sigma_2 \geq -R_{\perp\perp}^A \end{cases} \quad (15)$$

А. Рук в своей работе отмечал [11], что последний критерий был использован в качестве критерия для определения расслоения с применением дополнительного коэффициента ослабления  $f_w^{if} = 0,8$ , что в конечном итоге приводит к зависимости следующего вида:

вызывающих конечные разрушения (что можно считать деградацией материала), для параметров прочности могут быть введены ослабляющие факторы  $f_w$ . А. Рук сформулировал отношение степенного закона в [11]:

$$f_w = 1 - \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{1-D}} \right)^n \quad (18)$$

где  $\sigma_{1-D} = \pm \xi X_t$ ,

Однако, установить  $\xi$  и  $n$  не составляло возможности. Был выбран второй вариант описания процесса деградации, который производился с помощью эллиптической функции:

$$c_{line} = \frac{f_{E0}}{\left( \frac{|\sigma_1|}{X} \right)}; \quad a_{ellipse} = \frac{1-s}{\sqrt{1-M^2}} \quad (19)$$

ной причиной разрушения сцепления СПА с бетоном является отслоение профиля арматуры от основного стержня. Для моделирования данного процесса предлагается использовать модель связанной зоны – Cohesive zone model (CZM), в которой разрушения матрицы связующего рассматриваются как постепенное отделение поверхности профиля арматуры от основного стержня с

последующим расслоением [12]. Разрушение поверхности контакта происходит постепенно вследствие деградации свойств склеивающей матрицы в контактном слое, что позволяет моделировать расслоение для прогнозирования допустимой величины сцепления СПА.

Работу материалов в области расслоения можно охарактеризовать с помощью нормальных или касательных напряжений и зазоров расслоения (в данном случае образование зазора происходит за счет тангенциального проскальзывания стержня относительно бетона) [12]. В результате чего допускается 3 вида разделения:

1 – смешанный вариант разделения по нормали и по касательной;

2 – сдвиг (смешанный вариант разделения по нормали и по касательной);

3 – отрыв (нарушение сцепления по нормали).

Процесс разделения двух связанных поверхностей арматуры (основного стержня и профиля арматуры) предлагается описывать склеенным контактом с использованием описания модели билинейного поведения материала.

В данной работе применяется модель соединения и разрушения контакта соединения 2-го вида, а именно сдвига. Расслоение вдоль контактной поверхности арматуры, а в данном случае «стержень-профиль», обладает существенным значением для несущей способности сцепления композитной арматуры с бетоном.

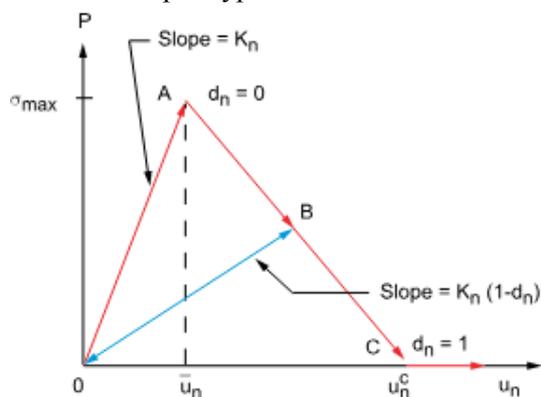


Рис. 4. Модель билинейного поведения материала в зоне контакта

На рисунке 4 показан график модели билинейного поведения профиля арматуры со стержнем [12].

$$\sigma_n = K_n u_n (1 - d_n) \quad (22)$$

где  $\sigma_n$  – напряжение;  $K_n$  – контактная жесткость;  $u_n$  – смещение по касательной в контактной области;  $d_n$  – параметр нарушения связывающей матрицы.

Параметр нарушения склеивающей матрицы:

$$d_n = \left( \frac{u_n - \bar{u}_n}{u_n} \right) \left( \frac{u_n^c}{u_n^c - \bar{u}_n} \right) \quad (23)$$

где  $\bar{u}_n$  – смещение (длина скольжения) в контактной зоне при максимальном напряжении;  $u_n^c$  – смещение в контактной зоне при разрушении склеивающей матрицы [12].

При  $\Delta_n \leq 1$ , при  $\Delta_n > 1$ ,  $0 < d_n \leq 1$ , где  $\Delta_n = \frac{u_n}{u_n^c}$ .

При этом энергия критического разрушения вычисляется как:

$$G_{cn} = \frac{1}{2} \sigma_{max} u_n^c \quad (24)$$

где  $\sigma_{max}$  – максимальное контактное напряжение.

Для расчета требуются ориентировочные данные экспериментальных исследований, а именно должны быть заданы  $\bar{u}_n$ ,  $u_n^c$  и  $K_n$ . Для их установления были использованы ранее полученные экспериментальные кривые зависимости «напряжение – смещение» [12]. Площадь под кривой представляет собой критическую энергию разрушения при разделении поверхностей профиля и стержня.

#### Анализ накопления повреждений в арматуре

Технология производства профиля СПА и металлической арматуры различна. СПА производится с помощью навивки ровинга, а металлическая арматура с помощью проката профиля. С точки зрения сцепления с бетоном – это особенно важно, потому что металлическая арматура имеет единую структуру и работает как единое изделие, перераспределяя напряжения по всему стержню. В тоже время профиль и стержень СПА работают как два различных материала, в которых распределение напряжений происходит через склеивающую матрицу. Это означает, что применять один критерий понятия дефекта (повреждения) для СПА и металлической арматуры будет некорректно. Само понятие повреждения имеет диапазон значений от 0 до 1, в котором под 1 подразумевается полное разрушение материала.

Как было упомянуто ранее, такой подход для СПА недопустим, так как она является композиционным материалом (с ортотропными свойствами), в состав которого входит стекловолоконная фибра и органическое вяжущее. Поэтому для корректного исследования понятия дефекта необходимо рассматривать отдельно такие факторы как:

- разрушение волокна растяжением;
- разрушение волокна сжатием;
- разрушение матрицы СПА растяжением;
- разрушение матрицы СПА сжатием;

Для удовлетворения этих факторов применялся критерий разрушения материала А.Рукс.

Как было установлено, первостепенной при-

чиной разрушения сцепления СПА с бетоном является отслоение профиля арматуры от основного стержня. Для решения данной задачи применяется модель CZM, описывающая этот процесс (см. пункт выше).

Однако, кроме среза профиля СПА происходит накопление дефектов в арматуре. Как показано на рис. 5, максимальное накопление повреждений с учетом всех принятых нами факторов наблюдается на витках СПА в области анкеровки и равняется 1,579.

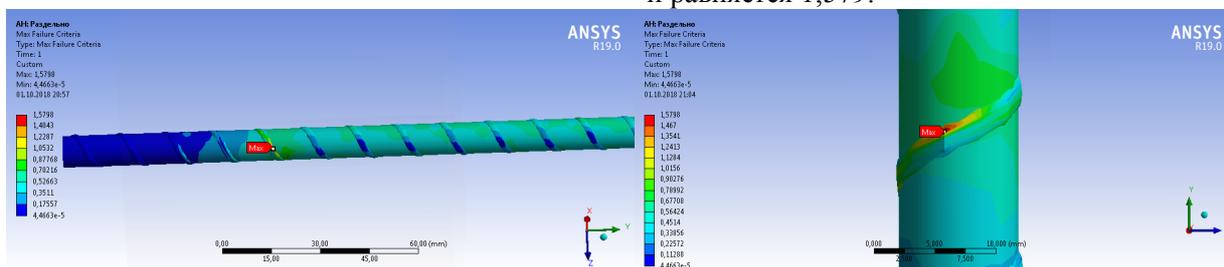


Рис. 5. Максимальные повреждения СПА

При отдельном рассмотрении критериев повреждений из рисунка бб видно, что эти повреждения образуются вследствие растягивающих усилий в волокне, которые примерно в 1,5 раза выше максимально допустимой величины. Следует отметить, что в основном стержне эта величина составляет 0,35, что указывает на то, что арматура не выработала свой резерв.

В то же время, из-за действия сжимающих

усилий волокна в витках СПА так же разрушаются, хотя величина повреждений ниже. Однако, в основном стержне величина повреждений от сжимающих усилий выше, чем от растягивающих, и составляет 0,47 от них.

Данные разрушения в СПА подтверждаются испытанием на вырыв арматуры из бетона В15. Разрушение профиля СПА происходит по верхним слоям витка, а в основном стержне повреждений не наблюдается.

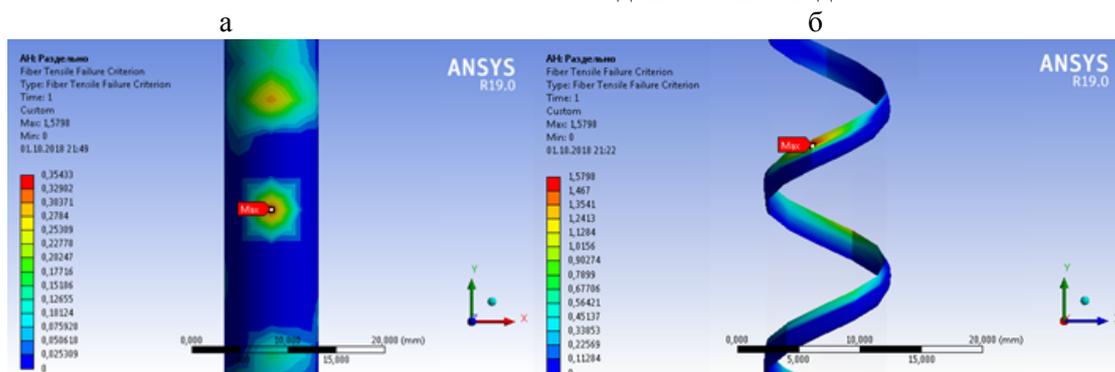


Рис. 6. Разрушение волокон СПА растягивающими усилиями: а) у основного стержня; б) у периодического профиля арматуры

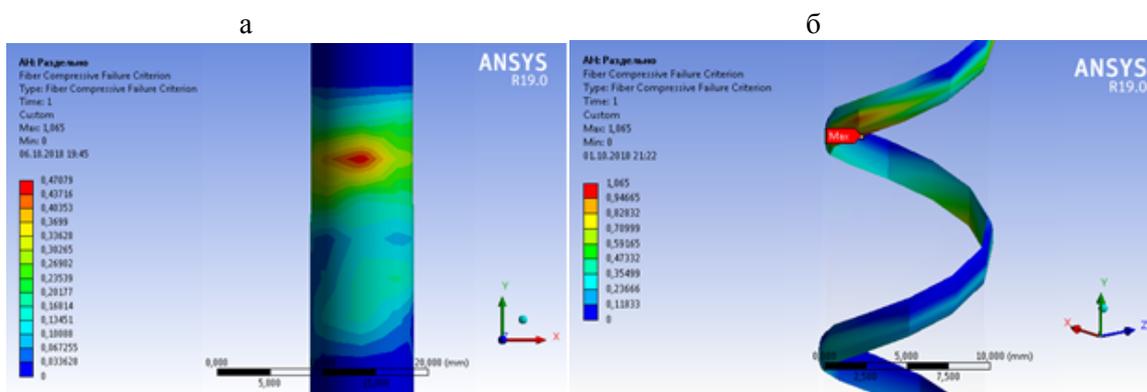


Рис. 7. Разрушение волокон СПА сжимающими усилиями: а) у основного стержня; б) у периодического профиля арматуры

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что воздействие растягивающих и сжимающих усилий волокна профиля СПА в основном

стержне оказывает малое влияние на работу арматуры с бетоном. Однако, разрушение волокон профиля ведет к снижению величины сцепления (рис. 7).

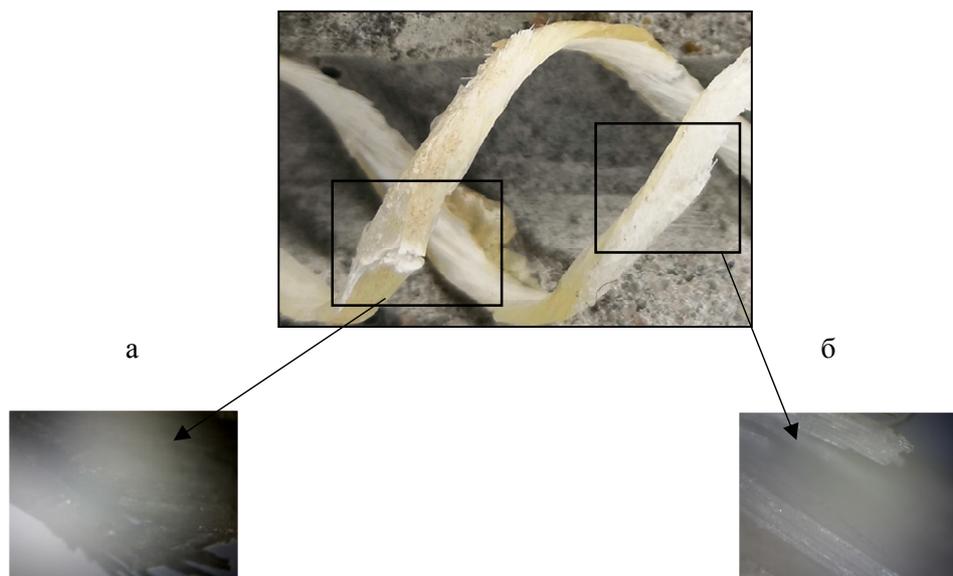


Рис. 8. Разрушение волокон в периодическом профиле СПА  
 а) разрушения от растягивающих усилий; б) разрушения от сжимающих усилий

Исходя из общих принципов, можно легко установить следующее: линейные дефекты в структуре волокон с параллельной структурой и одной плоскостью скольжения не накладываются друг на друга. Это можно наблюдать в витках профиля, когда разрушение внешних волокон не ведет к последующему разрушению композита, такому как при линейном расположении структуры в витках с параллельным расположением волокон. Волокна, относящиеся к общей плоскости скольжения, находятся на таком расстоянии, что зоны вызываемых разрушений не перекрываются; взаимного влияния на разрушения практически не оказывается. Менее очевидно установление характера взаимодействий между линейными дислокациями одного знака, но относящихся к различным плоскостям скольжения, хотя принцип остается тем же самым.

Наглядность разрушения матрицы можно считать подтверждением адекватности построенной модели, потому что характер образования разрушений в численной модели СПА такой же,

как у экспериментальных образцов. Так, максимальные разрушения матрицы происходят во внешних волокнах и к середине образца затухают.

Наблюдается, что разрушения матрицы в основном стержне в области анкеровки составляют 0,76 от растягивающих усилий, что объясняет редкие случаи в выборке испытаний, когда арматура разрушалась по стержню без окончания испытания на вырыв. Следует отметить, что такое же разрушение замечалось при испытаниях с заделкой анкера  $l/d \geq 6$ , так как величина разрушения матрицы возрастала.

Разрушение матрицы представляет собой отслоение волокон композита вдоль сопрягающих слоев, что оказывает значимую роль в ограничении прочности и податливости как «матрично-матричных» композитов, так и слоистых композитных структур. Это является основной причиной разрушения СПА. В качестве примера обратного эффекта можно привести разрушение матрицы витков профиля, которое достигает 0,297 (рис. 9а).

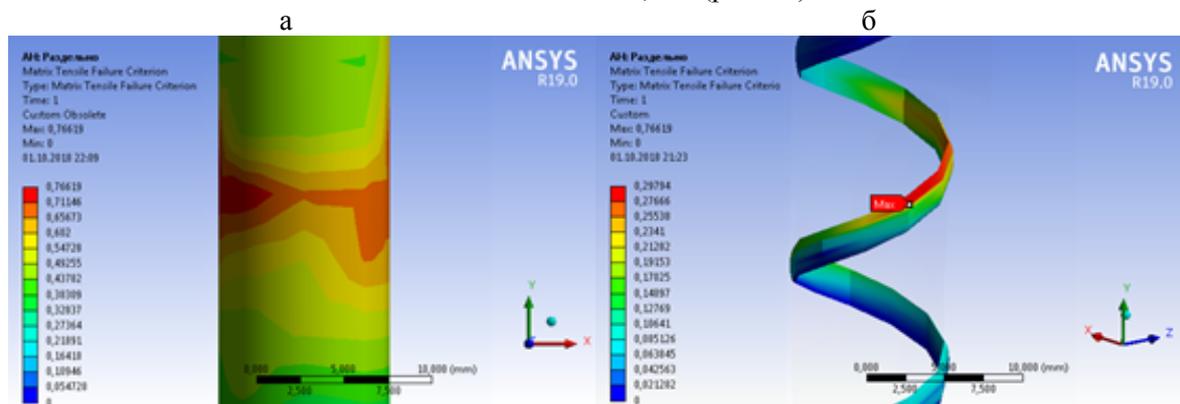


Рис. 9. Разрушение матрицы СПА растягивающими усилиями:  
 а) у основного стержня; б) у периодического профиля арматуры

При рассмотрении разрушения матрицы сжимающими усилиями, в стержне и в профиле повреждения минимальны, а величины принимают значения ниже 0,1. У СПА в зоне контакта

сжимающие усилия минимальны, и слоистая структура хорошо их воспринимает.

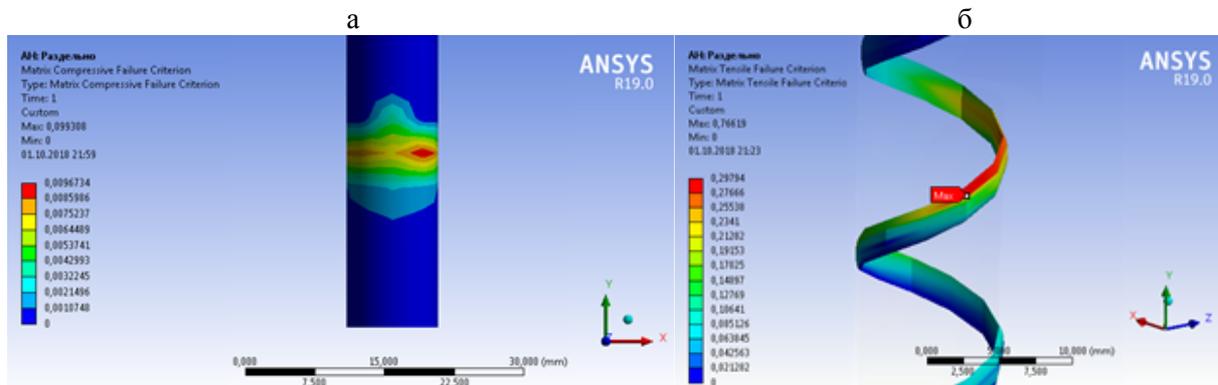


Рис. 10. Разрушения матрицы СПА сжимающими усилиями: а) у основного стержня; б) у периодического профиля арматуры

Однако, следует отметить, что если скольжение одного волокна матрицы по-другому продолжается по вновь возникающим дислокациями и ничем не затормаживается, то без дальнейшего увеличения нагрузки начинается смещение волокон внутри матрицы, которое преобразуется в сдвиговые усилия между пучками волокон относительно друг друга, приводящие к значительному общему относительному удлинению структуры СПА и последующему разрушению. Однако, проскальзывания одного волокна по-другому может и не произойти, что приведет к упрочнению матрицы, которая выступает в роли тормозящей или предотвращающей перемещение.

Другой причиной скольжения по тем плоскостям, по которым происходит разрушение матрицы, является изменение ориентации плоскостей направления скольжения вследствие их поворота (угол, составляемый ими с осью СПА образца, уменьшается при его растяжении). Следует, конечно, иметь в виду, что вследствие возникновения дефектов с одной стороны и поворота пачек волокон относительно другой создаются условия для повышения составляющих касательных напряжений по всем плоскостям, что может привести к скольжению и по другим, новым плоскостям волокон.

В случае винтовых скольжений разрушение должно происходить в перпендикулярном или параллельном оси скольжения направлениях. Поэтому одной из причин, препятствующих разрушению матрицы СПА, является пересечение волокон в различных плоскостях в том случае, если они не компланарны, так как не существует параллельного или перпендикулярного направления всем трем некомпланарным волокнам.

Все процессы, приводящие к уменьшению

потенциала энергии внутри матрицы (что равносильно уменьшению ее искаженности), делают состояние матрицы более устойчивым. Вопреки этому, расшатанности матрицы повышают ее потенциальную энергию.

**Выводы.** Анализ результатов численных исследований позволил установить, что наибольшую степень влияния на прочность СПА при решении задачи сцепления оказывают такие параметры, как ориентация и прочность волокна СПА по направлению перерезывающих усилий (или сменяющих усилий на бетонных консолях), габаритные размеры стержня и податливость бетонного массива.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холмянский М.М. Контакт арматуры с бетоном. М.: Стройиздат, 1981. 184с.
2. Хозин В.Г. [и др.] Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном // Известия КГАСУ. 2013. № 1 (23). С. 214–220.
3. Овчинникова И.Г. Напряженно деформированное состояние бетона в области силового воздействия с арматурой. В. кн.: Сцепление арматурой с бетоном. Челябинск. ЦНТО Стройиндустрия, МИСИ, ЧПИ, НИИЖБ, ВНИИ Железобетон, 1971.
4. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости Общие технические условия. НИИБЖ им. А. А. Гвоздева. М., 2014. 56 с.
5. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. НИИБЖ им. А.А. Гвоздева. М., 2013. 42 с.
6. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости

и коэффициента Пуассона. Министерством металлургии СССР. М., 1983. 36 с.

7. ANSYS Mechanical APDL theory reference // Release 15.0. Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2013. 952 p.

8. Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10. № 2. P. 157–165.

9. Menetrey P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. Diss. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, 1994. Infoscience. Web.

10. Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete // Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses. International Association for Bridge and Structural Engineering. 1975. No. 19. Pp. 1–30.

11. Puck A. Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. Carl Hanser. 1996.

12. 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.

#### Информация об авторах

**Николюкин Алексей Николаевич**, аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: valax1@yandex.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д.112.

**Ярцев Виктор Петрович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений». E-mail: kzis@nnn.tstu.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д.112.

**Коломникова Ирина Игоревна**, бакалавр. E-mail: kolomnikova\_ii@mail.ru. Тамбовский государственный технический университет. Россия, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112.

Поступила в марте 2019 г.

© Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Коломникова И.И., 2019

<sup>1,\*</sup>Nikolyukin A.N., <sup>1</sup>Yartsev V.P., <sup>1</sup>Kolomnikova I.I.

<sup>1</sup>Tambov State Technical University

Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112

E-mail: valax1@yandex.ru.

## NUMERICAL MODELING OF COMPOSITE FITTINGS FOR CLUTCHING WITH CONCRETE

**Abstract.** Reinforced concrete is one of the most common materials in construction. Constructions made of this material have a high bearing capacity; well perceived dynamic and static loads. This is ensured by the adhesion between the reinforcing bar and concrete. The amount of adhesion is made from a number of different factors formed in the region of the conventional surface of interaction of reinforcement with concrete. It is implied that even if any reinforcement is used, materials come into contact over the surface, which can collapse depending on the load. Violation of the clutch causes significant deformation of the structure, which subsequently leads to a loss of the bearing capacity of the element. Therefore, there is a need to study the magnitude of the adhesion between concrete and reinforcement under various influences. This article describes the results of a numerical experiment on pulling out fiberglass reinforcement of a periodic profile from concrete. A mathematical model is constructed, which allows to study the accumulation of defects and the destruction of reinforcement in the area of concrete fixing. The results of numerical studies are considered.

**Keywords:** concrete, fiberglass reinforcement, adhesion, digging, mathematical model, destruction.

### REFERENCES

1. Holmyanskij M.M. Contact reinforcement with concrete [Kontakt armatury s betonom]. М.: Strojizdat. 1981, 184 p. (rus)

2. Hozin V.G. and other. Coupling polymer composite reinforcement with cement concrete

[Sceplenie polimerkompozitnoj armatury s cementnym betonom]. Izvestiya KGASU. 2013. No. 1 (23). Pp. 214–220. (rus)

3. Ovchinnikova I.G. Stress-strain state of concrete in the field of force action with reinforcement [Napryazhenno deformirovannoe sostoyanie betona v oblasti silovogo vozdeystviya s armaturoj]. V. kn.: Sceplenie armaturoj s betonom. CHelyabinsk.

CPNTO Strojindustriya, MISI, CHPI, NIIZHB, VNII Zhelezobeton. (rus)

4. GOST 10060-2012. Concretes. Methods for determining the frost resistance General technical conditions [*Betony. Metody opredeleniya morozostojkosti Obshchie tekhnicheskie usloviya*]. NIIBZH im. A. A. Gvozdeva. M. 2014. 56 p. (rus)

5. GOST 31938-2012. Composite polymer reinforcement for reinforcement of concrete structures. General technical conditions [*Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstrukcij. Obshchie tekhnicheskie usloviya*]. NIIBZH im. A. A. Gvozdeva. M. 2013. 42 p. (rus)

6. GOST 24452-80. Concretes. Methods for determining the prism strength, elastic modulus and Poisson's ratio [*Betony. Metody opredeleniya prizmennoj prochnosti, modulya uprugosti i koefficienta Puassona*]. USSR Ministry of Metallurgy. M., 1983. 36 p. (rus)

7. ANSYS Mechanical APDL theory reference. Release 15.0. Canonsburg, Pennsylvania, USA. 2013. 952 p.

8. Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10. № 2. P. 157-165.

9. Menetrey P. Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. Diss. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. Lausanne. 1994. Infoscience. Web.

10. Willam K.J., Warnke E.P. Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete. Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses. International Association for Bridge and Structural Engineering. 1975. No. 19. Pp. 1-30.

11. Puck A. Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. Carl Hanser. 1996.

12. Kashevarova G.G., Martirosyan A.S., Travush V.I. Computational and experimental study of the process of destruction of bonds of adhesion when pressing a rod of rigid reinforcement into concrete [*Raschetno-ehksperimental'noe issledovanie processa razrusheniya svyazej scepneniya pri vdavlivanii sterzhnya zhestkoj armatury v beton*]. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. 2016. No. 3. Pp. 62-75. (rus)

#### Information about the author

**Nikolyukin, Alexey N.** Postgraduate student. E-mail: valax1@yandex.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112.

**Yartsev, Viktor P.** DSc, Professor. E-mail: kzis@nnn.tstu.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112.

**Kolomnikova, Irina I.** Bachelor student. E-mail: kolomnikova\_ii@mail.ru. Tambov State Technical University. Russia, 392032, Tambov, st. Michurinskaya, 112.

---

*Received in March 2019*

#### Для цитирования:

Николюкин А.Н., Ярцев В.П., Коломникова И.И. Численное моделирование композитной арматуры для задачи сцепления с бетоном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 5. С. 56-65. DOI: 10.34031/article\_5ce292ca089623.21062637

#### For citation:

Nikolyukin A.N., Yartsev V.P., Kolomnikova I.I. Numerical modeling of composite fittings for clutching with concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 56-65. DOI: 10.34031/article\_5ce292ca089623.21062637