

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48

¹Меркулов С.И., ²Есипов С.М., ²Каишуба С.О.¹Курский государственный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ

Аннотация. В доступных для исследования и анализа источниках, в том числе и действующих нормативных документах, крайне сжато рассматриваются методики расчета усиленных внешних армированием элементов при работе на кручение. В данной статье рассмотрен ряд существующих апробированных методик расчета железобетонных изгибаемых элементов с внешним композитным армированием, в том числе при работе с кручением. Описана необходимость введения в существующие расчетные зависимости предпосылок обоснования поведения железобетонных изгибаемых элементов, в том числе с внешним композитным армированием, при работе в сложном напряженно-деформированном состоянии. Рассмотрены случаи возникновения дополнительных крутящих усилий в условиях классических вариантов нагрузок и воздействий на элемент. Предположено описание работы железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением. Приведены основные положения работы железобетонных конструкций при изгибе с кручением. Приведены основные предельные состояния, а также сделаны предположения о возможном наличии дополнительных предельных состояний железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами. Предложен вариант условия пропорциональности продольных относительных деформаций для железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением.

Ключевые слова: железобетонные конструкции с внешним композитным армированием, сопротивление кручению с изгибом, расчет на прочность, сложное напряженно-деформированное состояние, пространственная трещина.

Введение. В современной практике строительства все чаще встречаются сложные очертания строительных конструкций, требующие особого подхода к проектированию и конструированию. Для достижения всех требований безопасной эксплуатации зданий и сооружений, при экономической обоснованности и эффективности, необходимо применение самых современных методик проектирования.

Для реализации различных конструктивных особенностей сложных очертаний, целесообразно применение железобетона, а внешнее композитное армирование, получающее в последнее время широкую популярность, будет способствовать увеличению несущей способности строительного элемента, при экономии бетона и арматурной стали.

При работе конструкций на простой изгиб, может произойти ряд ситуаций: появление случайных эксцентриситетов приложения нагрузки, асимметрия несущего сечения, неоднородность конструкции, неравномерная осадка здания или сооружения. Данные ситуации заставляют конструкции дополнительно воспринимать усилие кручения, вызывая в изгибаемых элементах сложно-деформированное состояние – кручение с изгибом.

Кроме случайных факторов, строительные конструкции первоначально могут работать на

кручение с изгибом, например, балки с боковыми консолями, краевые балки, наклонные арки и другие. При эксплуатации зданий и сооружений, в случае недооцененности влияния кручения, на несущую способность сечения при изгибе, может произойти обрушение строительных конструкций.

Материалы и методы. Работа железобетонных конструкций при совместном воздействии изгибающего момента и кручения является достаточно полно изученной отраслью современной строительной науки. За последние несколько лет ряд проведенных исследований [1-5] способствовали актуализации накопленных знаний по данному вопросу и появлению пособия по расчету железобетонных элементов, работающих на кручение с изгибом, выпущенному Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации в 2020 году.

В соответствии с методикой расчета, изложенной в пособии, прочность стержневых железобетонных конструкций с прямоугольным поперечным и продольным сечениями при совместном действии изгибающих и крутящих моментов производится на основании модели пространственных расчетных сечений.

Предложено считать, что при одновременном действии в одном элементарном сечении изгибающих и крутящих моментов, по достижении

исчерпанию несущей способности на трещиностойкость, в железобетонном элементе возникает пространственная спиральная трещина, расположенная в пределах трех граней элемента. При этом в замыкающей четвертой грани появляется условная линия раздела сжатой и растянутой зон, которые в совокупности образуют пространственное сечение сложной формы. Если принять

a

данную теорию, то может существовать три схемы расположения сжатой зоны (рис. 1 б–г): у верхней грани элемента, сжатой от изгиба (схема I), у боковой грани элемента, параллельной плоскости изгиба (схема II), у нижней грани элемента, растянутой от изгиба (схема III).

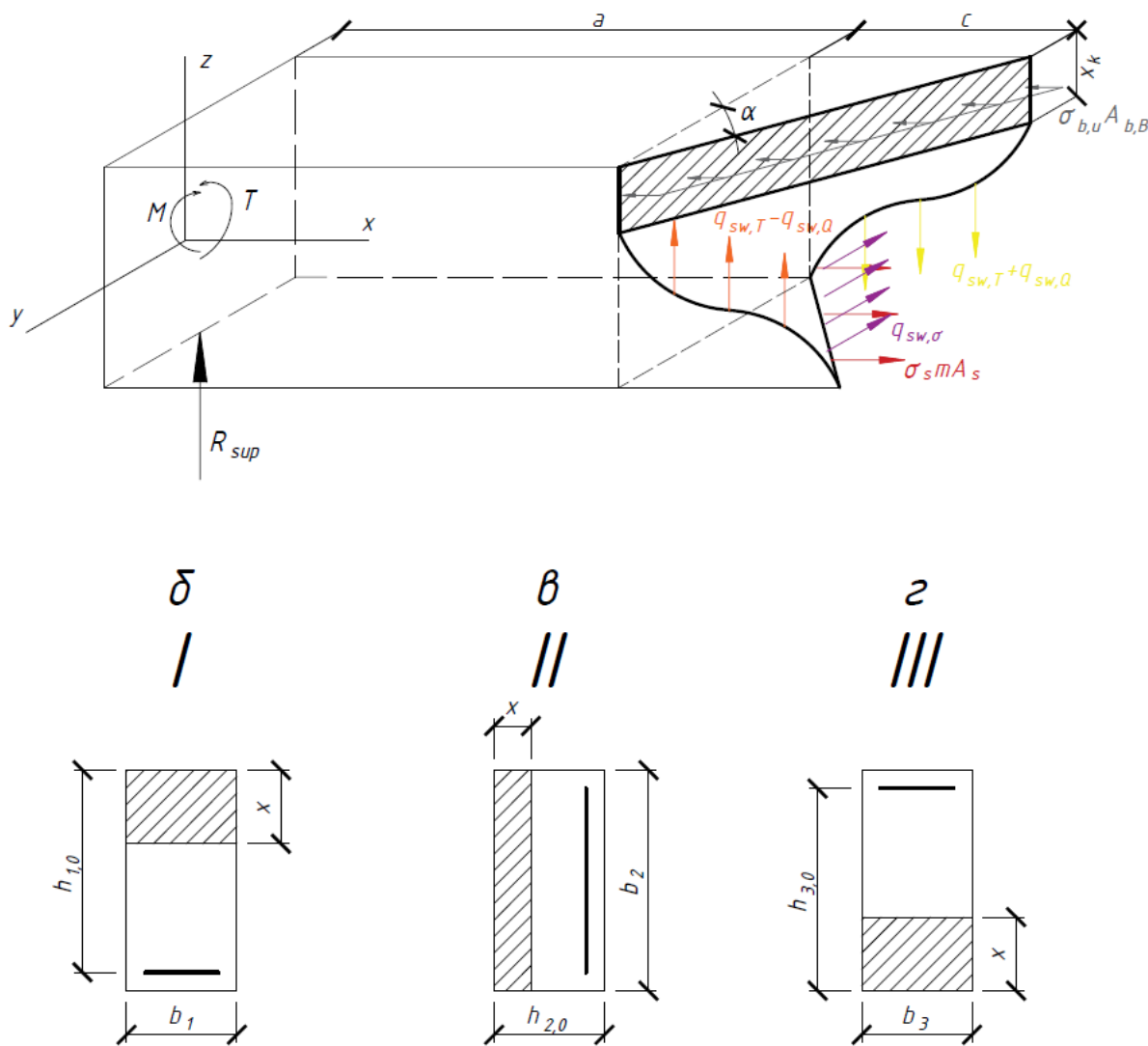


Рис. 1. Усилия в пространственном сечении (а) и схемы (I, II, III) расположения сжатой зоны (б – г) в железобетонном элементе при изгибе с кручением

В качестве внешних усилий в расчете необходимо использовать: для схемы I – крутящий (Т) и изгибающий (М) моменты; для схемы II – крутящий момент (Т) и дополнительный изгибающий момент (М), возникающий от действия поперечной силы (Q), которая действует по оси сечения расположенной в центре тяжести сжатой зоны, принимается приближенно $Q \cdot h/2$; для схемы III — крутящий момент (Т) и изгибающий момент (М). Однако, в этом случае, изгибающий момент меняет знак вследствие поворота сече-

ния. Для всех схем, крутящий момент (Т) определяется как равнодействующий момент, возникающий от действия поперечной нагрузки на плечо, равно половине ширины сечения, по оси сечения, расположенного в центре тяжести.

При расчете усилий в статически неопределимых элементах, дополнительно работающих с кручением, крутильный момент инерции сечения этого элемента определяется как для упругого тела, при использовании справочных данных, методов сопротивления материалов или теории упругости. Для сечений, которые имеют дефекты

в виде трещин, учитывается только неповрежденная часть бетона и арматура.

Для вычисления предельного момента от работы внешних сил учитываются все (постоянные + длительные + кратковременные) нагрузки, точки приложения которых приходятся с одной стороны от координат положения расчетного пространственного сечения. При учете нагрузок, действующих по длине элемента в зоне пространственного сечения, используется следующее правило: расчетный крутящий момент (T), изгибающий момент (M) и поперечная сила (Q) вычисляются в поперечном сечении, проходящем через центр тяжести сжатой зоны пространственного сечения.

По причине различного расположения сжатой зоны бетона при расчете по различным схемам разрушения, в общем случае обозначения дополняются индексом (i) ($i = 1, 2, 3$, см. рис. 1) и для конкретных схем разрушения им присваиваются соответствующие номера. В расчет принимаются нормальные и касательные напряжения в бетоне сжатой зоны.

Проведенными экспериментальными исследованиями [1–5] было установлено, что угол наклона спиральной пространственной трещины к продольной оси изогнутого элемента всегда превышает 45° , поэтому длина проекции пространственного сечения (c) при аналитическом обосновании любой из представленных ниже схем разрушения, в первом приближении принимается равной $2 \cdot h + b$, после чего результат уточняется итерационно. В общем случае, рекомендовано производить не менее 4-х расчетов при условии прямоугольной формы сечения, при разных положениях относительно граней элемента пространственного сечения и выбрать в качестве ведущего расчет, предполагающий наименьшую предельно допустимую нагрузку. Почти всегда, после 3–4 итераций, координаты точек начала и окончания расположения расчетного сечения становится очевидным.

В расчетные условия принимается продольная и поперечная (при наличии) арматура с заданными расчетными сопротивлениями и модулями упругости 1-го и 2-го рода. Однако, при случае переармирования, напряжения в продольной арматуре могут не успеть достичь предела текучести, в то время как бетон сжатой зоны потеряет прочность по пространственной форме. Противоположная ситуация имеет место быть при недостаточном проценте армирования, то есть при большом количестве поперечной арматуры в сравнении с расчетной продольной, что, однако, не характерно для изгибаемых элементов стержневого типа. Такая ситуация может наблю-

даться при проектировании железобетонных балок-стенок. В итоге, в общем случае напряжения в арматуре могут не достичь собственного предела текучести в момент времени, когда бетон сжатой зоны потерял прочность в пространственном сечении. Поэтому, в качестве критерия несущей способности целесообразно принять достижение бетоном своих предельных деформаций в пространственной трещине.

Основная часть. Совместное действие железобетонного элемента с внешним композитным армированием при изгибе детально рассмотрено в [6–20].

Автор отмечает, что железобетонный элемент с внешним армированием композитными материалами представляет собой конструкцию, учитывающую работу трех отличных друг от друга материалов: бетон, стальная внутренняя арматура и композитное внешнее армирование. При этом должен быть учтен такой важный параметр, как критическое касательное напряжение в клеевом шве внешнего армирования. Этим фактором определяется и ряд специфических вопросов расчета таких конструкций, а именно: обеспечение прочности контактной зоны; учёт ползучести и усадки бетона.

Выделяются следующие предельные состояния изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами:

- разрыв внешней арматуры при достижении стальной арматуры предела текучести без разрушения сжатой зоны бетона;
- разрушение бетона сжатой зоны при уровне напряжений во внешней арматуре ниже расчетных (случай переармированных элементов);
- разрушение бетона сжатой зоны при совместном достижении стальной арматуры предела текучести и пластических деформаций в зоне контакта композитное внешнее армирование – бетон;
- отслоение элементов из композитных материалов.

В общем случае, введение в расчет на изгиб с кручением железобетонного элемента композитного армирования повлечет за собой увеличение компонентов внутренних сил. В стадии упругой работы сопротивление внешнего композитного армирования будет разделяться на две составляющие: продольное, которое зависит от площади сечения композитного армирования и его расчетного сопротивления; поперечное, которое является следствием возникновения пространственного сечения, зависит от площади сечения композитного армирования, его расчетного сопротивления и угла наклона спиральной трещины.

Таким образом, можно предположить, что при расчете на прочность железобетонного элемента с внешним композитным армированием на изгиб с кручением, необходимо в расчетные уравнения добавить слагаемые, которые будут характеризовать положение, площадь сечения и прочность внешнего композитного армирования.

На рис. 2 представлены предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы I расположения сжатой зоны. При данной схеме

сжатая зона расположена в верхней части сечения, композитное армирование под растяжением, таким образом, оно будет оказывать влияние на сумму изгибающих моментов в нормальном и пространственном сечении, а также на сумму усилий вдоль оси X в нормальном и пространственном сечении. В работе будет участвовать вся площадь сечения композитного армирования, для нормального сечения, а для пространственного сечения необходимо учитывать всю площадь среза, которая проходит под углом α к боковой грани элемента.

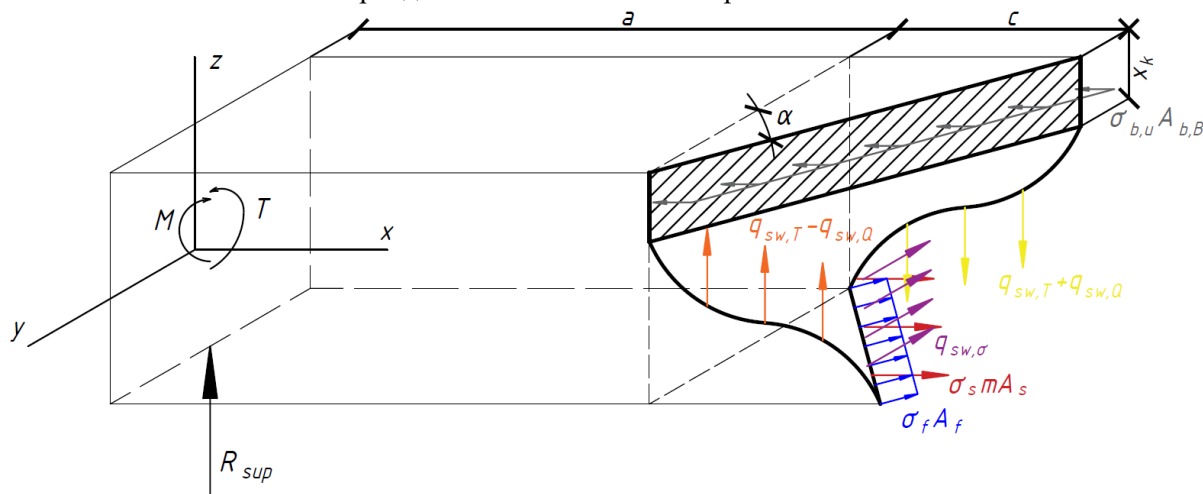


Рис. 2. Предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы I расположения сжатой зоны

На рис. 3 представлены предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы II расположения сжатой зоны. При данной схеме сжатая зона расположена в боковой части сечения, композитное армирование частично под растяжением, таким образом, оно будет оказывать влияние на сумму изгибающих моментов в нормальном и пространственном сечении, а также на

сумму усилий вдоль оси X в нормальном и пространственном сечении. В работе будет участвовать площадь растянутой части сечения композитного армирования, для нормального сечения, для пространственного сечения будет учитываться площадь среза растянутой части сечения, которая проходит под углом α к боковой грани элемента.

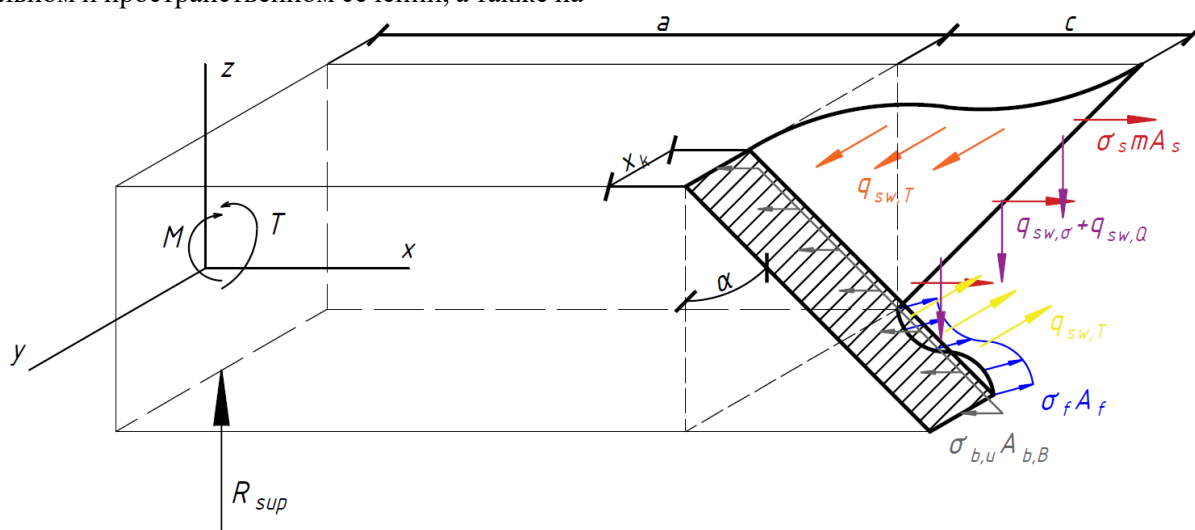


Рис. 3. Предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы II расположения сжатой зоны

На рис. 4 представлены предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы III расположения сжатой зоны. При данной схеме

сжатая зона расположена в нижней части сечения, композитное армирование полностью под сжатием, таким образом, оно не будет оказывать влияние на работу такого элемента.

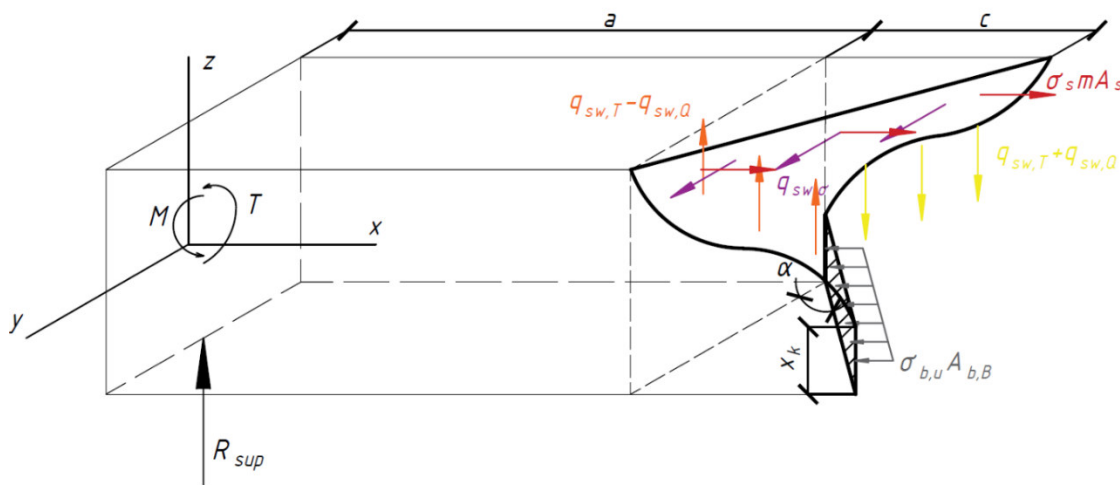


Рис. 4. Предполагаемые усилия в пространственном сечении в железобетонном элементе с внешним композитным армированием при изгибе с кручением, для схемы III расположения сжатой зоны

Также, для возможности совместной работы всех компонентов, при условии достижения стадии разрушения всех материалов одновременно, необходимо соблюсти условие пропорциональности продольных деформаций. Без учета внешнего композитного армирования, оно будет иметь вид:

$$\frac{\sigma_{s,l}}{E_s(\lambda) \cdot (h_{1,0} - x)} = \frac{\sigma_{b,l,u}}{E_b(\lambda) \cdot x} \tag{1}$$

А при добавлении внешнего композитного армирования, примет следующий:

$$\frac{\sigma_{s,l}}{E_s(\lambda) \cdot (h_{1,0} - x)} + \frac{\sigma_{f,l}}{E_f(\lambda) \cdot (h - x + 0.5 \cdot h_f)} = \frac{\sigma_{b,l,u}}{E_b(\lambda) \cdot x} \tag{2}$$

Однако, при введении в расчет композитного армирования, соблюдения условия пропорциональности продольных деформаций недостаточно. Композитное армирование может выйти из расчета при отслоении его элементов или потере прочности зоны контакта композитное внешнее армирование – бетон. В таком случае, одним из факторов, определяющих несущую способность усиленного элемента, будет являться достижение касательного напряжения в клеевом шве критического значения, которое можно приближенно описать формулой:

$$\tau_{f,cr} = \frac{\alpha \cdot T_{x,max}}{\beta \cdot h' \cdot b^2} \tag{3}$$

где α и β – коэффициенты, зависящие от соотношения приведенной высоты сечения к приведенной ширине, то есть с учетом введенного в расчет внешнего армирования;

$T_{x,max}$ – максимальный крутящий момент в сечении;

h' – приведенная высота сечения;

b' – приведенная ширина сечения.

Основным вопросом, требующим исследования, является уточнение коэффициентов, входящих в формулу (3), с учетом наличия высоко модульного материала по одной из граней. Очевидно, что величины коэффициентов будут меняться по сравнению с классическими величинами, используемыми в строительной механике и сопротивлении материалов. Также, при увеличении деформации, то есть при увеличении ширины раскрытия пространственных трещин нет точного понимания о характере работы композитного внешнего армирования. Это означает, что после наступления в сечении крутящего момента, большего, чем предельный момент трещинообразования при кручении, коэффициенты, входящие в формулу (3), изменятся. Авторы считают, что для уточнения коэффициентов следует принимать уравнения работ всех сил в сечении на виртуальных перемещениях, предложенных А.А. Гвоздевым с введением в них поправочного коэффициента, определенного на основании изменения коэффициента армирования после включения в работу композитного внешнего армирования. Железобетонная конструкция с трещинами в

осях, совпадающих с направлением стержней рабочей арматуры (случай ортотропного армирования), работает как анизотропный материал в общем случае анизотропии. При этом анизотропия зависит от угла наклона трещин к направлениям арматуры. В общем случае, данный угол одинаков при использовании однонаправленных элементов внешнего армирования и усилении растянутых зон по направлению продольных осей. Это приводит к дополнительному теоретическому выводу, что при образовании пространственной трещины спиралевидной формы, в элементарных площадках внешнего армирования будут возникать дополнительные напряжения, которые однонаправленные волокна не в силах воспринять. Это означает необходимость разработки методики определения углов пространственных трещин для всех случаев изгиба с кручением. Полученные углы будет рекомендовано использовать при размещении элементов усиления и их поворота относительно продольной оси усиливаемого элемента.

Выводы. При всей проработанности тем работы железобетонных конструкций при действии изгиба с кручением и внешнего композитного армирования, нет общего понимания о поведении железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при действии изгиба с кручением.

Композитное армирование несомненно увеличит несущую способность конструкции в целом для упругой стадии работы элемента. Достаточно просто определить все параметры напряженно-деформированного состояния усиленной конструкции на этапе упругой работы, но нет точного понимания о поведении таких конструкций в упругопластической стадии работы, что требует дальнейших научных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 4(72). С. 17–26.
2. Колчунов В.И., Сальников А.С. Результаты экспериментальных исследований трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 6(68). С. 22–28.
3. Демьянов А.И., Покусаев А.А., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 5(73). С. 5–14.
4. Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И. Некоторые результаты экспериментальных

исследований составных железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 5(79). С. 13–23.

5. Сальников А.С., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Расчетная модель образования пространственных трещин первого вида в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 3. С. 35–40.

6. Меркулов С.И., Есипов С.М. Экспериментальные исследования сцепления внешней композитной неметаллической арматуры с бетоном // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения*. 2017. № 1. С. 93–97.

7. Римшин В.И., Меркулов С.И., Есипов С.М. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2018. № 2(35). С. 93–100. DOI: 10.5281/zenodo.1286034

8. Есипов С.М., Есипова Д.В. Критерии совместности работы композитного внешнего армирования и железобетонной конструкции при силовых воздействиях // *Международный студенческий строительный форум - 2018 (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова) : Сборник докладов*. В 2-х томах, Белгород, 26 ноября 2018 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 64–69.

9. Меркулов С.И., Есипов С.М. Бетонные конструкции с неметаллической композитной арматурой // *Безопасность строительного фонда России проблемы и решения: материалы Международных академических чтений, Курск, 15 ноября 2019 года*. Курск: Курский государственный университет, 2019. С. 218–226.

10. Кузнецова М.С., Попова М.В. Особенности расчета железобетонных изгибаемых элементов, усиленных композитными материалами // *Дни науки студентов ИАСЭ - 2021 : Материалы научно-практической конференции, Владимир, 22 марта – 09 2021 года*. Владимир: Владимирский государственный университет, 2021. С. 178–181.

11. Гаврилова Е.О. Усиление изгибаемых элементов композиционными материалами // *Академическая публицистика*. 2021. № 8-2. С. 111–119.

12. Волик А.Р., Новицкий Я.Я. Экспериментальные исследования железобетонных балок с внешним армированием растянутой грани композитными тканями // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. 2022. Т. 12. № 1. С. 117–125.

13. Старовойтова И.А., Шакиров А.Р., Зыкова Е.С., Семёнов А.Н., Сулейманов А.М. Исследование физико-механических характеристик модифицированных клеевых связующих для систем внешнего армирования строительных конструкций // Строительные материалы. 2021. № 1-2. С. 98–104. DOI:10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-98-104

14. Карась М.С., Кушель Р.О. Экспериментальные исследования несущей способности железобетонных балок, усиленных композитными тканями в середине пролёта // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 13–14 мая 2021 года. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2021. С. 122–125.

15. Масловская В.Е. Исследование и выбор методов и технологий армирования монолитных бетонных и многослойных конструкций с применением композитных материалов и композитной арматуры // Наука и молодежь : Материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 19–23 апреля 2021 года. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2021. С. 137-138.

16. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных

конструкций, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 288–298. DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298

17. Курнавина С.О., Антонов М.Д. Поле направлений трещин в железобетонных изгибаемых элементах, усиленных композитными материалами // Строительство и реконструкция. 2020. № 1(87). С. 3–13. DOI:10.33979/2073-7416-2020-87-1-3-13

18. Балдин Д.Ю., Краев А.Н., Жайсамбаев Е.А. Сравнительный анализ способов усиления железобетонных тавровых балок // Транспортные сооружения. 2020. Т. 7. № 2. С. 3. DOI:10.15862/05SATS220

19. Адамович Д.Н. Нормирование прочностных характеристик композитной арматуры при проектировании и расчёте бетонных и железобетонных конструкций // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 21–22 мая 2020 года. Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2020. С. 30–34.

20. Умаров А.Г., Меретуков З.А., Умаров Р.Г. К вопросу внедрения современных материалов и технологий в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2021. № 2(74). С. 285–293.

Информация об авторах

Меркулов Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Курский государственный университет. Россия, 305000, Курск, ул. Радищева, д. 33.

Есипов Станислав Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кашуба Сергей Олегович, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: kashuba_sergey@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.03.2022 г.

© Меркулов С.И., Есипов С.М., Кашуба С.О., 2022

¹*Merkulov S.I.,* ²*Esipov S.M.,* ²*Kashuba S.O.*

¹*Kursk State University*

²*Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*

PRELIMINARY DESCRIPTION OF THE WORK OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH EXTERNAL REINFORCEMENT WITH COMPOSITE MATERIALS DURING BENDING WITH TORSION

Abstract. *The calculation methods of reinforced external reinforcement elements when working on torsion are considered succinctly in available sources and current regulatory documents. This article discusses a number of existing proven methods for calculating reinforced concrete bendable elements with external composite reinforcement, including when working with torsion. The necessity of introducing into the existing cal-*

culatation dependences of the prerequisites for substantiating the behavior of reinforced concrete bendable elements, including those with external composite reinforcement, when working in a complex stress-strain state is described. The cases of occurrence of additional torsional forces in the conditions of classical variants of loads and impacts on the element are considered. A description of the work of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion is proposed. The main provisions of the work of reinforced concrete structures in bending with torsion are given. The main limiting states are presented. An assumptions are made about the possible presence of additional limiting states of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials. A variant of the condition of proportionality of longitudinal relative deformations for reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion is proposed.

Keywords: reinforced concrete structures with external composite reinforcement, torsion resistance with bending, strength calculation, complex stress–strain state, spatial crack.

REFERENCES

1. Demyanov A.I., Salnikov A.S., Kolchunov V.I. Experimental studies of reinforced concrete structures in torsion with bending and analysis of their results [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom i analiz ix rezultatov]. Building and reconstruction. 2017. No. 4(72). Pp. 17–26. (rus)
2. Kolchunov V.I., Salnikov A.S. Results of experimental studies of cracking of reinforced concrete structures during torsion with bending [Rezultaty eksperimentalnykh issledovanij treshhinoobrazovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2016. No. 6(68). Pp. 22–28. (rus)
3. Demyanov A.I., Pokusaev A.A., Kolchunov V.I. Experimental studies of reinforced concrete structures in torsion with bending [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2017. No. 5(73). Pp. 5–14. (rus)
4. Demyanov A.I., Naumov N.V., Kolchunov V.I. Some results of experimental studies of composite reinforced concrete structures in torsion with bending [Nekotorye rezultaty eksperimentalnykh issledovanij sostavnykh zhelezobetonnykh konstrukcij pri kruchenii s izgibom]. Building and reconstruction. 2018. No. 5(79). Pp. 13–23. (rus)
5. Salnikov A.S., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Computational model of the formation of spatial cracks of the first type in reinforced concrete structures during torsion with bending [Raschetnaya model obrazovaniya prostranstvennykh treshhin pervogo vida v zhelezobetonnykh konstrukciyax pri kruchenii s izgibom]. Industrial and Civil Engineering. 2015. No. 3. Pp. 35–40. (rus)
6. Merkulov S.I., Esipov S.M. Experimental studies of coupling of external composite nonmetallic reinforcement with concrete [Eksperimentalnye issledovaniya scephleniya vneshnej kompozitnoj nemetallicheskoj armatury s betonom]. Bezopasnost stroitelnogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. 2017. No. 1. Pp. 93–97. (rus)
7. Rimshin V.I., Merkulov S.I., Esipov S.M. Concrete structures reinforced with composite material [Betonnnye konstrukcii, usilennye kompozitnym materialom]. Fefu: school of engineering bulletin. 2018. No. 2(35). Pp. 93–100. (rus) DOI 10.5281/zenodo.1286034
8. Esipov S.M., Esipova D.V. Criteria for the compatibility of composite external reinforcement and reinforced concrete structures under force influences [Kriterii sovместnosti raboty kompozitnogo vneshnego armirovaniya i zhelezobetonnoj konstrukcii pri silovykh vozdeystviyakh]. Mezhdunarodnyj studencheskij stroitelnyj forum - 2018 (k 165-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shukhova) : Sbornik dokladov. Belgorod, November 26, 2018. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2018. Pp. 64–69. (rus)
9. Merkulov S.I., Esipov S.M. Concrete structures with non-metallic composite reinforcement [Betonnnye konstrukcii s nemetallicheskoj kompozitnoj armaturoj]. Bezopasnost stroitelnogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Kursk, November 15, 2019. Kursk: Kursk State University, 2019. Pp. 218–226. (rus)
10. Kuznetsova M.S., Popova M.V. Features of calculation of reinforced concrete bendable elements reinforced with composite materials [Osobennosti rascheta zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami]. Dni nauki studentov IASE - 2021 : Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. Vladimir, March 22–09, 2021. Vladimir: Vladimir State University, 2021. Pp. 178–181. (rus)
11. Gavrilova E.O. Reinforcement of bent elements with composite materials [Usilenie izgibaemykh elementov kompozitsionnymi materialami]. Akademicheskaya publicistika. 2021. No. 8–2. Pp. 111–119. (rus)
12. Volik A.R., Novitsky Ya.Ya. Experimental studies of reinforced concrete beams with external reinforcement of a stretched face with composite fabrics [Eksperimentalnye issledovaniya zhelezobetonnykh balok s vneshnim armirovaniem rastyanutoj grani kompozitnymi tkanyami]. Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Technique. 2022. Vol. 12. No. 1. Pp. 117–125. (rus)

13. Starovoitova I.A., Shakirov A.R., Zykova E.S., Semenov A.N., Suleymanov A.M. Investigation of physico-mechanical characteristics of modified adhesive binders for external reinforcement systems of building structures [Issledovanie fiziko-mekhanicheskix harakteristik modifitsirovannykh kleevykh svyazuyushhix dlya sistem vneshnego armirovaniya stroitelnykh konstrukcij]. Building Materials. 2021. No. 1–2. Pp. 98–104. DOI:10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-98-104 (rus)

14. Karas M.S., Kushel R.O. Experimental studies of the bearing capacity of reinforced concrete beams reinforced with composite fabrics in the middle of the span [Eksperimentalnye issledovaniya nesushhej sposobnosti zhelezobetonnykh balok, usilennykh kompozitnymi tkanyami v seredine prolyota]. Tradicii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitelstva : Sbornik nauchnykh statej. Grodno: Grodnenskiy gosudarstvennyj universitet imeni Yanki Kupaly, 2021. Pp. 122–125. (rus)

15. Maslovskaya V.E. Research and selection of methods and technologies of reinforcement of monolithic concrete and multilayer structures using composite materials and composite reinforcement [Issledovanie i vybor metodov i tehnologij armirovaniya monolitnykh betonnykh i mnogoslojnykh konstrukcij s primeneniem kompozitnykh materialov i kompozitnoj armatury]. Science and Youth : Materials of the XVIII All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Barnaul, April 19–23, 2021. Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, 2021. Pp. 137–138. (rus)

21. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Experimental studies of the stress-strain state of reinforced concrete structures reinforced with prestressed basalt composite reinforcement [Eksperi-

mentalnye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh konstrukcij, usilennykh predvaritelno napryazhennoj bazaltokompozitnoj armaturoj]. Structural mechanics of engineering constructions and buildings. 2021. Vol. 17. No. 3. Pp. 288–298. DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298 (rus)

16. Kurnavina S.O., Antonov M.D. The field of crack directions in reinforced concrete bendable elements reinforced with composite materials [Pole napravlenij treshhin v zhelezobetonnykh izgibaemykh elementah, usilennykh kompozitnymi materialami]. Building and reconstruction. 2020. No. 1(87). Pp. 3–13. DOI:10.33979/2073-7416-2020-87-1-3-13 (rus)

17. Baldin D.Yu., Kraev A.N., Zhaysambayev E.A. Comparative analysis of ways to strengthen reinforced concrete T-beams [Sravnitelnyj analiz sposobov usileniya zhelezobetonnykh tavrovyykh balok]. Russian journal of transport engineering. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 3–20. (rus)

18. Adamovich D.N. Normalization of strength characteristics of composite reinforcement in the design and calculation of concrete and reinforced concrete structures [Normirovanie prochnostnykh harakteristik kompozitnoj armatury pri proektirovanii i raschyote betonnykh i zhelezobetonnykh konstrukcij]. Tradicii, sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitelstva : Sbornik nauchnykh statej. Grodno: Grodnenskiy gosudarstvennyj universitet imeni Yanki Kupaly, 2020. Pp. 30–34. DOI:10.15862/05SATS220 (rus)

19. Umarov A.G., Meretukov Z.A. On the issue of the introduction of modern materials and technologies in construction [K voprosu vnedreniya sovremennykh materialov i tehnologij v stroitelstve]. Engineering Journal of Don. 2021. No. 2(74). Pp. 285–293. (rus)

Information about the authors

Merkulov, Sergei I. DSc, Professor. E-mail: mersi-dom@yandex.ru. Kursk State University. Russia, 305000, Kursk, st. Radischev, 33.

Esipov, Stanislav M. PhD. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kashuba, Sergei O. Postgraduate student. E-mail: kashuba99@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 20.03.2022

Для цитирования:

Меркулов С.И., Есипов С.М., Кашуба С.О. Предварительное описание работы железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48

For citation:

Merkulov S.I., Esipov S.M., Kashuba S.O. Preliminary description of the work of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 11. Pp. 40–48. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48