

Особенности методики расчета колонн, усиленных композитными материалами.

Болгов А.Н. к.т.н., Иванов С.И. к.т.н., Кузеванов Д.В. инж. (НИИЖБ) Фаткуллин В.В. инж. (ООО «Варма-Строй»)

Одним из перспективных способов усиления железобетонных колонн является усиление - наклейкой лент из композитных материалов (КМ) из стекло -, угле - и арамидных волокон. Наклейка лент может вестись как вдоль колонн, так и в поперечном направлении для создания замкнутых хомутов-бандажей. Эффективность усиления экспериментально подтверждена исследователями в нашей стране [2] и за рубежом.

Нормативный документ на применение данного способа усиление в нашей стране отсутствует. Единственным документом в настоящее время, является «Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами» [1] который носит рекомендательный характер. При разработке рекомендаций [1] за основу приняты положения норм ACI [4], а также экспериментальные исследования лаборатории железобетонных конструкций и контроля качества НИИЖБ и анализ зарубежных авторов.

В европейской системе нормативных документов на сегодняшний день также отсутствует нормативный документ для проектирования конструкций с применением композитных материалов. Такой документ по информации европейского технического комитета CEN TC 250 находится в стадии разработки. На сегодняшний день в Европе выпущен научно-технический и информационный бюллетень FIB [7].

С ростом объемов проектирования и выполнения работ по усилению конструкций с применением КМ внимание в нашей стране со стороны проектировщиков и исследователей к документу [1] увеличивается.

Настоящая статья посвящена анализу расчета несущей способности колонн, усиленных КМ, с учетом следующих особенностей:

- направление наклейки КМ;
- формы сечения колонны;
- типа обоймы (сплошная и разреженная в виде т.н. бандажей или спирали);
- эксцентриситета продольных сил.

Учет принципа усиления: Необходимо четко разделять принципы усиления: установка дополнительной арматуры в растянутой зоне колонны или создание обойм для повышения прочности бетона за счет создания объемного напряженного состояния. Несмотря на очевидность различий, практика экспертизы реализованных усилений показывает необходимость четкого разграничения принципов усилений и вытекающих из них конструктивных требований.

В Руководстве [1] введено такое разделение: при усилении наклейкой композита в продольном направлении (вдоль рабочей арматуры) предложено расчет нормальных сечений вести по СНиП 2.03.01-84* [5] с учетом приведенной к характеристикам металла добавочной арматуры. Требуемую площадь добавочной арматуры рекомендуют находить согласно нормам [5]. Напомним, что указанный документ для колонн требует обязательного учета напряженного состояния к моменту усиления (учет усиления под нагрузкой). При этом подробной методики такого расчета ни в нормах ни в Руководстве [1] не приведено. Это требует особого внимания проектировщиков. Альтернативой расчету по методу предельных усилий [5] может являться расчет колонн на основе деформационной модели СП 52-101-2003 с уче-

том положений Руководства [1] для аналогичного расчета изгибаемых элементов.

Кроме этого, особое внимание при проектировании следует уделять обеспечению анкеровки продольных лент, которая должна осуществляться заведением волокон за расчетное сечение на длину, достаточную для передачи усилия на ленту. Так как, как правило, расчетное сечение для колонн расположено вверху и внизу колонн данное требование сопряжено с необходимостью устройства сквозных отверстий в плитах перекрытий, что существенно усложняет применение данного решения.

Учет формы усиливаемого сечения становится определяющим при другом принципе усиления – наклейке полос КМ (направление волокон перпендикулярно оси усиливаемого элемента) в виде замкнутых элементов – бандажей. Возникающий при этом эффект обоймы, ведет к увеличению прочности бетона.

Данный механизм повышения прочности используется в косвенно армированных элементах [5] и трубобетоне.

Учитывая ограниченный объем экспериментальных и теоретических исследований обойм из КМ в нашей стране, при составлении Руководства [1], методика расчета сжатых элементов заимствована из норм АСІ [4] в редакции 2002г. Специальных исследований, посвященных вопросам гармонизации с отечественными нормами, не проводилось.

Анализ теоретических и экспериментальных зарубежных исследований представлен в работе А.А. Шилина и др. [6].

Предложенный в Рекомендациях [1] метод расчета колонн с обоймами основан на методе предельных усилий, при этом начальные усилия в колоннах, усиливаемых под нагрузкой не учитываются. Между тем, не учет данного фактора может существенно снижать эффективность усиления, так как на-

чальных усилий, а следовательно продольных и поперечных деформаций, уже проявившихся до усиления, не вызовут усилий в конструкции усиления. Логично полагать, что отрицательное влияние данного фактора будет более значительней, чем большее усиление действует в колонне в момент усиления.

Методика расчета сжатых элементов, усиленных КМ в АСІ [4] основана на исследованиях Дж. Мандера 1988г, который для цилиндрических образцов при центральном сжатии в металлической обойме предложил следующую зависимость:

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94\sigma_R}{f'_c}} - 2 \frac{\sigma_R}{f'_c} - 1.254 \right) \quad (1)$$

Последующие исследования с внешним армированием КМ была показана возможность распространения этой формулы и для данного способа, при этом максимальное радиальное давление обоймы предложено оценивать по формуле (2).

$$\sigma_R = f_l = \frac{k_a \rho_f \varepsilon_{fe} E_f}{2} \quad (2)$$

Где $\varepsilon_{fe} E_f \leq 0,75R_f$ - допустимое предельное напряжение в обойме; $k_a=1,0$ коэффициент эффективности обоймы для круглого сечения; $k_a<1,0$ - для прямоугольного сечения, ρ_f - отношение площади сечения самой обоймы из углепластика к площади усиливаемого сечения (по нормальному сечению колонны).

Основная критика такого подхода связана с заложенной в расчетную модель постоянной величиной бокового давления на всех этапах нагружения.

Указанная модель вошла в Руководство [1], в том числе в качестве упрощенного расчета прямоугольных сечений:

$$R_{b,hoop} = R_b \left(2.254 \sqrt{1 + (558.18 \frac{R_l}{R_b})} - 140.6 \frac{R_l}{R_b} - 1.254 \right) \quad (3)$$

где $R_l = 0,0038K_lR_f$, $K_l = 2t_f \frac{b+h}{bh}$

Указанная формула (3) отсутствует в зарубежных нормах, но может быть получена из (1) и (2) подстановкой рекомендуемых расчетных характеристик материалов ($\varepsilon_{fe}E_f = 0,75R_f$) и коэффициента эффективности обоймы $k_a=0,7$.

Однако, согласно зарубежным исследованиям коэффициент эффективности обоймы k_a для колонн прямоугольного сечения, не является постоянным и зависит от радиуса закругления граней. В АСІ k_a предлагается вычисляется по формуле:

$$k_a = 1 - \frac{(b - 2r)^2 + (h - 2r)^2}{3bh(1 - \mu)} \quad (4)$$

где b, h – габариты прямоугольного сечения колонны, r – радиус закругления граней, μ – коэффициент армирования.

На рис.1 приведены значения коэффициента эффективности обоймы k_a для колонны квадратного сечения в зависимости от габаритов и радиуса закругления граней при одинаковом коэффициенте армирования.

Как следует из графика на рис.1 для квадратных сечений k_a изменяется в диапазоне от 0.33 до 0.75. Таким образом, отклонение формулы (3) от норм АСІ может составлять от 15 до 30% в сторону завышения прочности бетона $R_{b,hoop}$.

В этом случае для определения приведенной прочности бетона для колонн прямоугольного сечения можно рекомендовать пользоваться общей зависимостью, выражаемой формулами (1) и (2) с подстановкой величины коэффициента эффективности обоймы прямоугольного сечения, уточненной по формуле (4). Такой подход вполне согласуется с зарубежными нормами.

В новой редакции 2008г норм США [3] разработчики отказались от описанной ранее методики Дж. Мандера, заменив ее более простой зависимостью Лама и Тенга (L. Lam, J. G. Teng) и предложив ввести расчетную диаграмму бетона при обжатии с применением деформационной модели (аналог СП 52-101-2003). Кроме того допускаемые предельные напряжения $\varepsilon_{fe}E_f$ в КМ обойме предложено снизить примерно на 30% с $0,75R_f$ до $0,55R_f$.

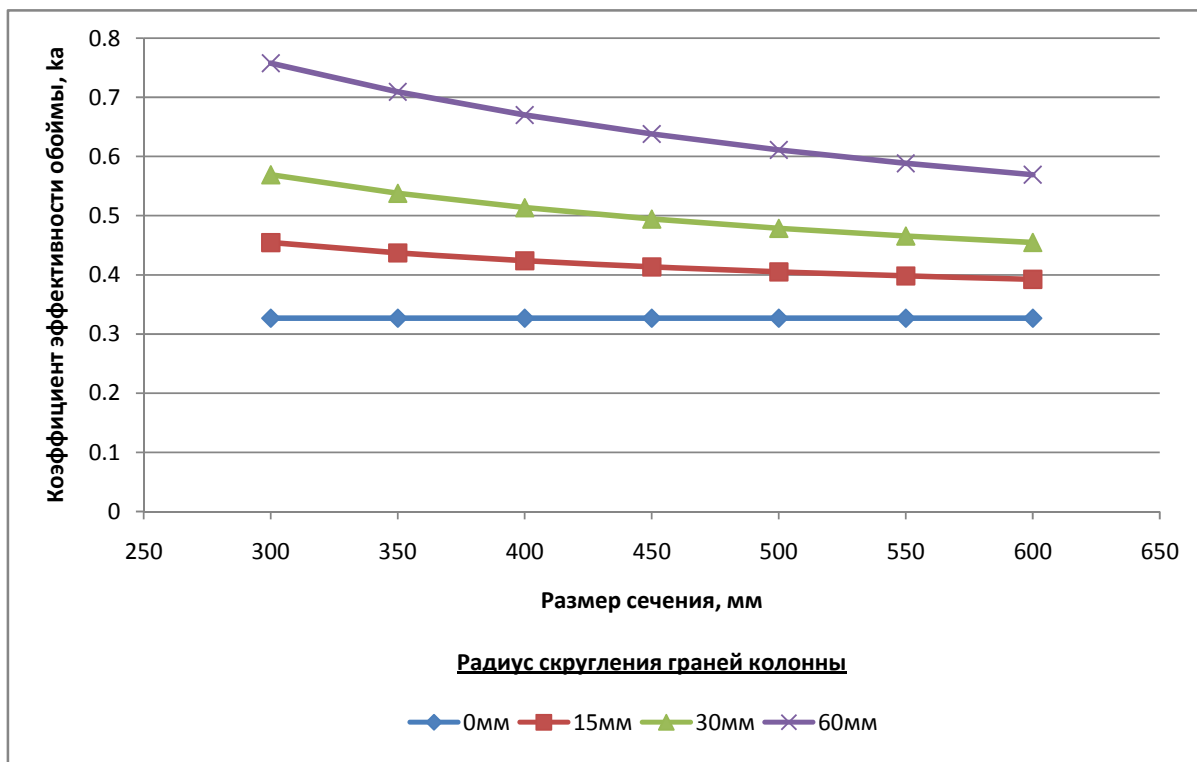


Рисунок 1. График зависимости коэффициента k_a от размеров прямоугольного сечения. Лаборатория железобетонных конструкций и контроля качества НИИЖБ www.niizhb2.ru

Учет вида обоймы: Следует учесть, что в Руководстве [1] рассмотрен только вариант усиления со сплошным обертыванием колонны по всей высоте. Приклейка бандажей с разряжением по высоте (см. рис. 2) этим документом не предусмотрена. Вместе с тем достаточно часто на практике реализуется приклейка лент-бандажей с определенным шагом.

В европейском бюллетене FIB [7] дается методика по учету эффективности обоймы с помощью коэффициента k_e , учитывающего уменьшение площади обжатого бетона между хомутами (рис. 2), но только для круглых колонн:

$$k_e = \left(1 - \frac{s'}{2D}\right)^2 \quad (5)$$

Значения коэффициента k_e , определенного в зависимости от относительного размера промежутка между бандажами или витками спирали s'/D , представлены на рисунке 3. Из рисунка следует, что для круглых колонн по мере увеличения расстояния между витками эффективность обоймы значительно снижается, и при расстояниях, равных 0,5-1 диаметр колонны составляет 50-20% соответственно.

Учет эксцентриситетов продольных сил:

Большинство экспериментальных данных и расчетных моделей было получено при центральном сжатии. Кроме того в исходном документе норм ACI [4] методики расчета с учетом эффекта обоймы (формулы (1) и (2)) относятся только к центрально сжатым элементам. Однако в руководстве [1] не достаточно четко оговорена применимость формул в случае сжатия с эксцентриситетом. Указания о повышении расчетной прочности бетона за счет эффекта обоймы только при осевом сжатии имеются лишь в п. 4.3.1(б) [1]. Для последующих разделов такого упоминания нет, что может ввести в заблуждение

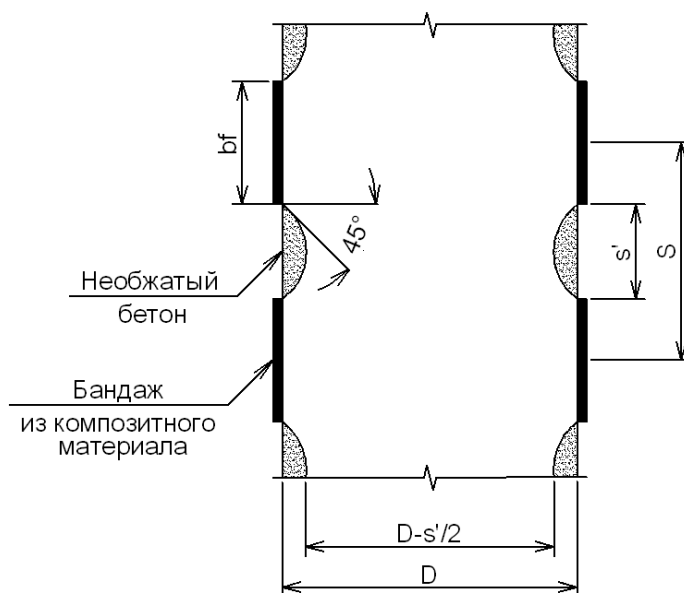


Рисунок 2. Расчетная схема колонны, усиленной отдельными бандажами (разреженное по высоте усиление).

проектировщиков, мало знакомых с деталями и особенностями методик расчета.

Допустимость учета эффекта обоймы в большинстве расчетных методик ограничена случаями малых эксцентриситетов. Так в новой редакции норм ACI [3] (редакция 2008г) введено условие, что при расчетном эксцентриситете $e > 0.1D$ или $0,1h$ эффект повышения прочности бетона при боковом обжатии не учитывается, либо учитывается по отдельной методике расчета. Аналогичное условие существует в европейских нормах для расчета трубобетонных конструкций Eurocode 4. Отечественный подход по учету эффекта повышения прочности бетона выражен при расчете колонн с косвенной спиральной арматурой по формуле п.3.22 (б) СНиП 2.03.01-84*[5]:

$$R_{b,red} = R_b + 2\mu_{cir}R_{s,cir} \left(1 - \frac{7.5e}{d_{ef}}\right)$$

Из формулы видно, что при эксцентриситете $e > 0.13d_{ef}$ значение в скобке у второго слагаемого становится отрицательным, что приводит к исчезновению влияния обжатия бетона.

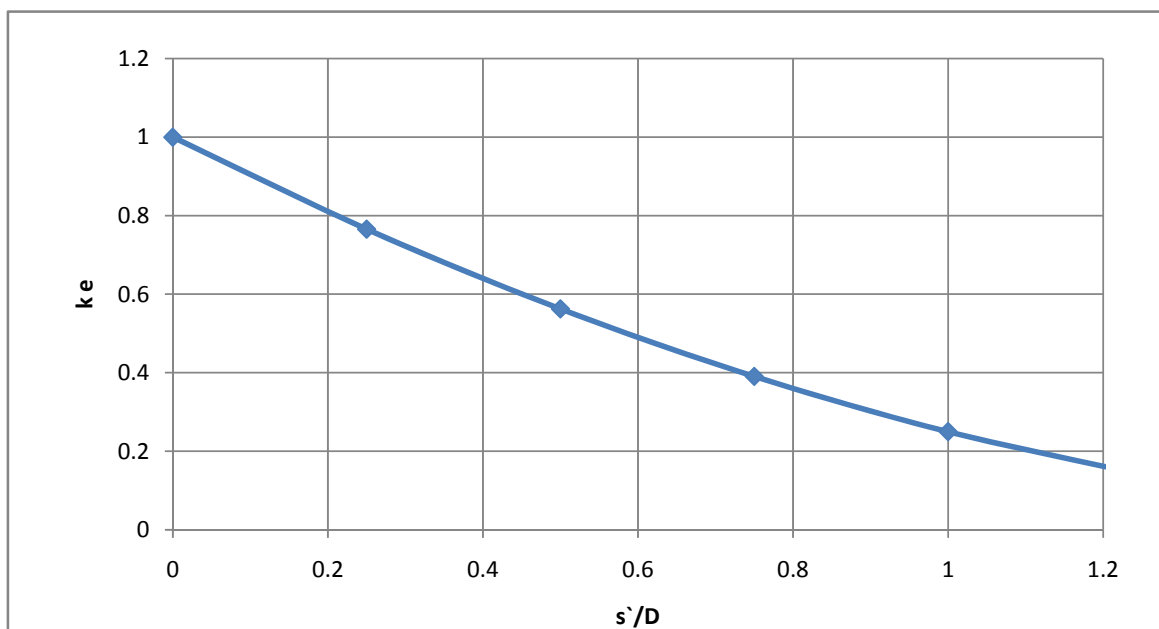


Рисунок 3. График зависимости коэффициента k_e от относительного расстояния между бандажами/витками (см. рис. 2).

Данные представления о границе проявления эффекта обоймы по разным нормам проектирования хорошо согласуются между собой. Отсюда можно рекомендовать область применения усиления колонн из КМ обойм – случаи сжатия с эксцентриситетом не более $0,1h$ (h -высота или диаметр сечения).

Данное ограничение следует учитывать при пользовании Руководством [1].

Необходимо отметить, что ряд вопросов несущей способности колонн, усиленных КМ остаются в нашей стране изученными недостаточно, а именно:

- не исследовано усиление колонн под нагрузкой;
- недостаточно изучены колонны с усилением имеющие большую гибкость ($\lambda > 14$);
- требуют дополнительной проверки надежность предложенных расчетных зависимостей в [1], так как заимствованные из АСІ формулы разрабатывались на основе обобщенного коэффициента запаса (подобие метода по разрушающим усилиям), тогда как

отечественные нормы проектирования имеют в своей основе полувероятностную модель с системой частных коэффициентов надежности.

Выводы:

1. При проектировании усиления колонн необходимо четко различать способ усиления: добавлением растянутой арматуры или созданием эффекта обоймы.
2. Для прямоугольных сечений не рекомендуется пользоваться формулами (4.71)-(4.73) Руководства [1]. Уточненный расчет рекомендуется вести по формулам (4.76), (4.77), (4.82) Руководства [1] или (1), (2), (4) настоящей статьи.
3. В руководстве [1] представлены формулы для сплошной обоймы усиления по всей высоте колонны. Для разреженных обойм усиления (т.н. усиление бандажами) следует учитывать снижение эффекта обоймы бетона по формуле (5).
4. Эффект обоймы рекомендуется учитывать при относительном эксцен-

триситете продольной силы не более $e/h < 0.1$.

5. Положения руководства [1], применительно к расчету сжатых элементов нуждаются в корректировке с учетом

результатов современных зарубежных и российских исследований, в том числе исследований надежности расчетных методик.

Список литературы:

1. *Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами*, М, 2006.
2. Грановский А.В., Костенко А.Н., Мочалов А.Л. Усиление железобетонных колонн каркасных зданий в сейсмоопасных районах с использованием элементов внешнего армирования из углеволокна. // «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений», 2007, №2.-С. 36- 38.
3. ACI 440.2R-08. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. ACI Committee 440, technical committee document, 2008.
4. ACI 440.2R-02. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures* ACI Committee 440, technical committee document, 2002.
5. СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции».
6. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. М: «Стройиздат»
7. «Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.» *Bulletin No. 14, FIB 2001. Technical Rep., Lausanne, Switzerland.*