



ПОДБОР УСИЛЕНИЯ УГЛЕКОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО УПРОЩЕННОЙ МЕТОДИКЕ

Статья от 16.07.2025.

Проблема

Имеется результат расчета, в котором выявлены дефициты (недостатки) армирования. На плане места таких дефицитов обычно обозначают рамкой по зоне дефицита. Над рамкой в качестве задания на усиление дают две цифры: требуемое по расчету армирование и фактически установленное. Ниже на рисунке показано как это обычно выглядит.

Что есть в нормах?

СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами» оставляет желать лучшего. Ручные методики расчета по СП не учитывают всего спектра усилий, возникающих в плите. Для изгибаемых элементов, например, нет учета продольных усилий, что во многих случаях очень критично. В СП предлагается считать по нелинейной деформационной модели (НДМ), что без специального программного комплекса/сапеллита простому инженеру крайне затруднительно. В ЛИРА-САПР, SCAD, ЛИРА-10, Ing+ еще нет реализованной функции прямого расчета без использования специального моделирования.

В инженерной практике зачастую пользуются приближенными упрощенными методами, которые дают вполне приемлемый результат.



Рисунок. Вид после усиления углеродными лентами.

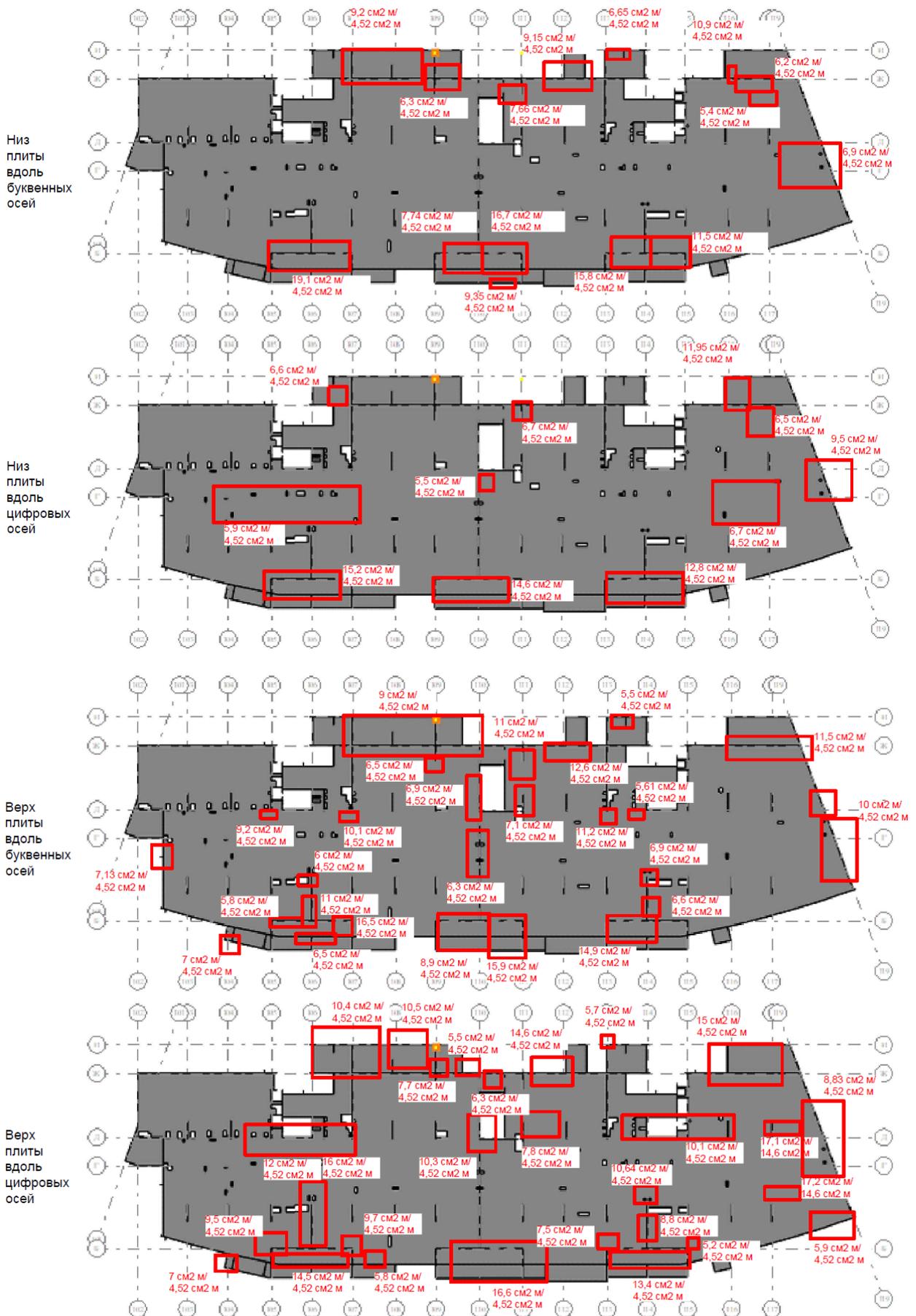


Рисунок. Определение дефицитов армирования. Первое число - требуемое армирование по расчету, второе число - фактически установленное армирование

В чем суть упрощенной методики?

Методика расчета, приведенная в СП 164.1325800., для расчета железобетонных элементов базируется на общем подходе, приведенном с СП 63.13330. Расчетные формулы СП 164.1325800. отличаются только введением слоя композита, который работает по аналогии с растянутой арматурой.

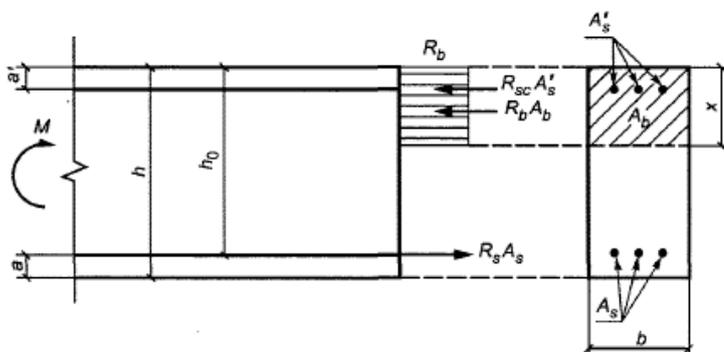


Рисунок. Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого железобетонного элемента, при его расчете по прочности в соответствии с СП 63.13330.

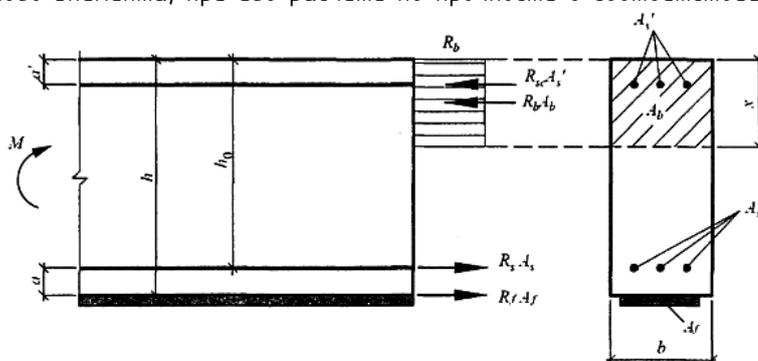


Рисунок . Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого железобетонного элемента, при его расчете по прочности в соответствии с СП 164.1325800.

Все подходы для подбора стальной арматуры реализованы в любом инженерном программном комплексе. Для упрощения производства подбора композитного материала может использоваться **методика подбора «ПО ЭКВИВАЛЕНТУ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ»**. Данная методика заключается в том, что имея результаты определения армирования стальной арматуры можно подобрать эквивалентную ей композитную. Т.е. определив в программе дефицит стального армирования производится ручной перерасчет на эквивалент композита.

Перерасчет осуществляется по двум критериям:

- по прочности: $R_f A_f = R_s A_s$;

- по жесткости: $E_f A_f = E_s A_s$.

R_f – расчетное сопротивление углеволокна;

A_f – площадь сечения углеволокна.

R_s – расчетное сопротивление стали;

A_s – площадь сечения стали.

Пример расчета углекомпозита

Результаты справедливы, если произведена разгрузка конструкции до момента выполнения усиления и нагрузка на момент усиления составляет не более 60% расчетной. Если нагрузка больше, то углеволокно полностью не включится в работу.

Расчетное сопротивление углекомпозита определено исходя из формулы СП 164.1325800.2014.

$$R_f = \frac{\gamma_{f1}\gamma_{f2}R_{f,n}}{\gamma_f}$$

где γ_f - коэффициент надежности по композитному материалу, принимаемый при расчете по предельным состояниям первой группы равным:

$\gamma_f = 1,2$ - для углекомпозита;

γ_{f1} - коэффициент условий работы композитного материала, принимаемый по таблице в зависимости от типа композитного материала и условий эксплуатации конструкции;

Коэффициенты условий работы γ_{f1} композитного материала

Условия эксплуатации конструкции	Тип композитного материала	Значение коэффициента γ_{f1} для	
		ламинатов	холстов, сеток и других тканых материалов
Во внутренних помещениях	Углекомпозит	0,95	0,9
На открытом воздухе	Углекомпозит	0,85	0,8
В агрессивной среде	Углекомпозит	0,85	0,8

$$\gamma_{f2} = \frac{1}{2,5\varepsilon_{f,ult}} \sqrt{\frac{R_b}{nE_f t_f}} \leq 0,9$$

,где

n - число слоев композитного материала;

t_f - безразмерный параметр, численно равный значению толщины одного слоя композитного материала, мм;

E_f - модуль упругости композитного материала, МПа;

R_b - расчетное значение сопротивления бетона осевому сжатию, МПа;

$\varepsilon_{f,ult}$ - значение предельных относительных деформаций композитного материала, определяемое по формуле $\varepsilon_{f,ult} = \frac{R_f}{E_f}$ при значении R_f , вычисленном по формуле $R_f = \frac{\gamma_{f1}\gamma_{f2}R_{f,n}}{\gamma_f}$ при $\gamma_{f2} = 1,0$.

Пример результатов расчета

Таблица 1. Характеристики материалов

Характеристики углеродной ленты	Характеристики арматуры	Характеристики бетона
<p>Плотность ленты: 530г/м² (в расчете не используется, но от этого значения зависят напрямую прочностные и деформационные свойства)</p> <p>Расчетная толщина слоя t_f: 0,000294м</p> <p>Модуль упругости композита E_f (принят на основании испытаний): не менее 22700кН/см²</p> <p>Прочность на растяжение (по данным производителя) (принят на основании испытаний) $R_{f,n}$: 4,09кН/см²</p>	<p>Расчетное сопротивление для арматуры класса А500С</p> <p>R_s: 43,5 кН/см²</p> <p>Модуль упругости E_f: 20 000 кН/см²</p>	<p>Расчетное сопротивление бетона класса В25</p> <p>R_b: 1,45 кН/см²</p>

Таблица 2. Определение прочности и жесткости углеволокна

№ зоны	Количество слоев n (не более 5)	Ширина ленты	Кол-во лент на 1 пог.м. ширины	γ_f	γ_{f1}	γ_{f2}	Коэффициент снижения прочности при повреждении отверстиями, K_1	$R_f A_f K_1$, кН	$E_f A_f K_1$, кН
1	3	30	2	1,2	0,9	0,252	0,95	388	114122

Таблица 3. Определение прочности и жесткости требуемой стальной арматуры (дефицит армирования)

№ зоны	Требуемая площадь арматуры по расчету A_s , см ²	Отношение $K_2 = h_0/h$	$R_s A_s K_2$, кН	$E_s A_s K_2$, кН
1	5,65	0,9	221	101736

Таблица 4. Коэффициенты использования

№ зоны	Коэффициент использования композита по прочности $R_f A_f K_1 / R_s A_s K_2$	Коэффициент использования композита по жесткости $E_f A_f K_1 / E_s A_s K_2$	Если коэффициент использования композита по жесткости более 1, то предусмотреть мероприятия по защите от коррозии арматуры
1	0,57	0,89	Защита от коррозии не предусматривается, поскольку коэффициент использования по жесткости меньше 1.

Сколько максимум дефицита можно «закрыть» углеволокном?

По опыту расчетов максимум закрывается дефицит армирования А500С в 15 см²/1 пог. м ширины плиты, т.е. диаметр 20 с шагом 200, что соответствует сплошной наклейке (без зазоров между лентами) в 5 слоев.

Калькулятор в EXCEL

Написана очень простенькая программа для решения «на коленке». Кому интересно, качайте, пользуйтесь: <https://дом-жбк.рф/Статья/>

Экспертиза упрощенные «инженерные» методы принимает?

Очень зависит от эксперта. Был как положительный так и отрицательный опыт. Эксперт, как правило, просит выполнить формальные «ручные» проверки для без учета продольных усилий по методике СП. Да, они могут не соответствовать тому результату, который был получен выше. Смиритесь, но экспертам зачастую нужно формальное соответствие СП, ГОСТ и ФЗ (простите товарищи эксперты, но зачастую это именно так). А методика, насколько бы она не была хороша, так и останется без понимания и без внесения в нормы (привет нормотворцам).

Что еще важно при прохождении экспертизы?

1. Важно, если вы проходите экспертизу предоставить отчет о долговечности углеволокна. Т.е. что оно не потеряет прочностные и деформационные характеристики в течении определенного времени: для зданий КС-2: минимум 50 лет, для КС-3 минимум 100 лет. Пока что автору известен один «монополист» производитель с таким отчетом на 70 лет долговечности.

2. Огнестойкость углеволокна. «Волшебная» обмазка может защитить углеволокно не более 180 минут пожара (и то нет уверенности в правдивости подтверждающих сертификатов), да и требуется ее возобновление один раз в 10-20 лет. Огнезащитное покрытие в виде минваты более надежно и долговечно, поскольку может обеспечить контролируемую расчетную огнестойкость и требует лишь визуального контроля при эксплуатации. Про определение толщины минваты будет отдельная статья.

Можно ли делать больше 5 слоев углекомпозита?

Да, можно, но работать углеволокно будет неэффективно, поскольку расчетное сопротивление будет снижаться (это видно из формулы определения расчетного сопротивления).

Согласно п 8.9 СП 164.1325800.2014 «Число слоев многослойного композитного материала системы внешнего армирования следует ограничивать в зависимости от силы сцепления композитного материала с поверхностью бетонного основания. Рекомендуемое число слоев следует принимать: для ламината – не более трех, для сеток, холстов и других тканых материалов – не более пяти».

При прохождении экспертизы при наличии в проекте более 5 слоев обычно эксперты требуют выполнить натурные испытания ссылаясь на то, что мол эта «рекомендация» накладывает ограничения на расчетные формулы. Данное недопонимание возникает в связи с недописанностью и недосказанностью норм (снова привет нормотворцам).