

1. Введение

Данная заметка написана в развитие опубликованной ранее: <https://dwg.ru/b/igos/236>. В ней ставится задача продемонстрировать более сложные случаи расчета усиления элемента железобетонной конструкции.

В качестве примера такого случая, предлагается рассмотреть усиление внецентренно-сжатого элемента с помощью предварительно напряженных распорок. Подобное решение является довольно распространённым в практике строительства и реконструкции, оно описано в нормативной и справочной литературе, в частности в «Рекомендациях по усилению монолитных железобетонных конструкций зданий и сооружений предприятий горнодобывающей промышленности», а также в справочнике под редакцией А.И. Мальганова «Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий». Кроме того, расчет подобных решений часто становится предметом обсуждений на профильных форумах, в частности: <http://forum.dwg.ru/showthread.php?p=1742427&#post1742427>.

Причин, почему часто возникают вопросы, несколько:

1. В справочной литературе приводятся формулы для проверки несущей способности элементов, полученные на основании метода предельных усилий (МПУ). В то же время, актуальный СП 63.13330.2012, п. 8.1.1, допускает использование данного метода лишь для определенных сечений с определенными типами армирования.

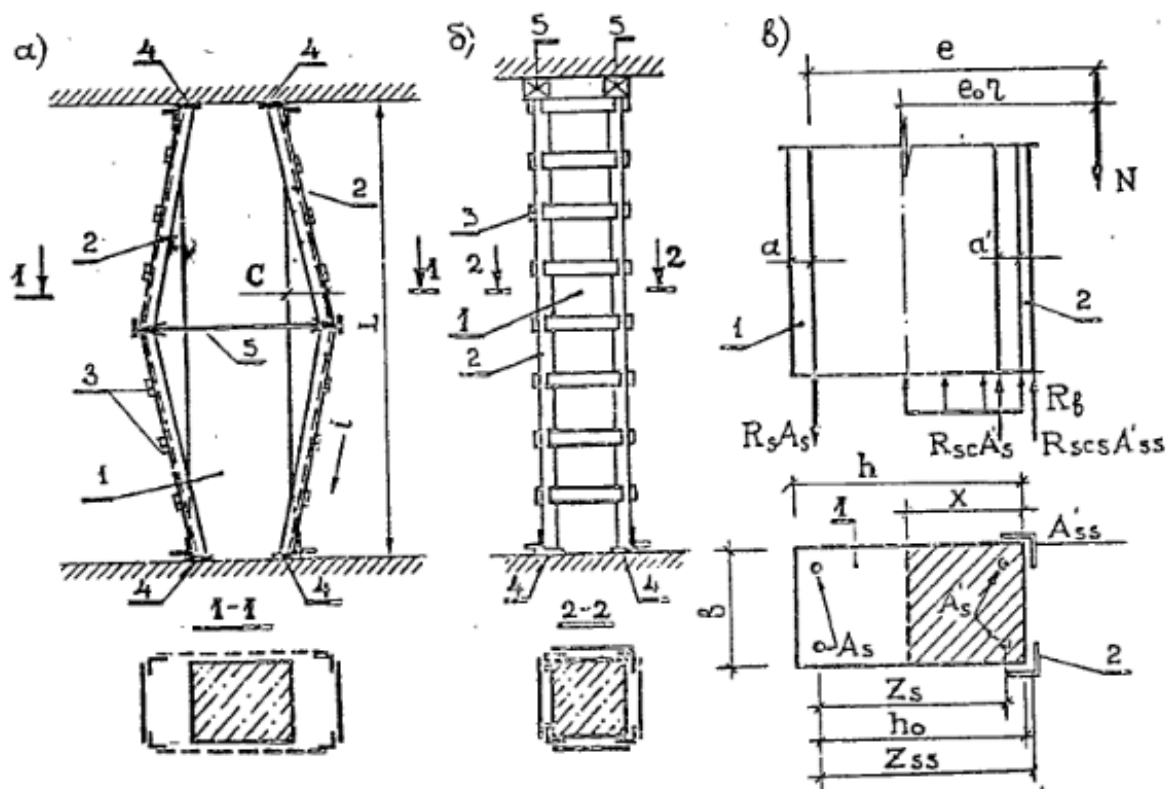
2. Приведенные формулы справедливы лишь для проверки сечений в случае изгиба в одной плоскости; случай вычисления несущей способности усиленного сечения при косом внецентренном сжатии не рассмотрен.

3. Рассматривается только определение несущей способности усиленного элемента, при этом расчеты по второй группе предельных состояний остаются «за скобками». Очевидно, что проверку прогибов сложно назвать актуальной задачей для внецентренно-сжатых железобетонных элементов (колонн), но трещиностойкость конструкций по актуальным нормам проверять требуется – как для вновь проектируемых, так и для усиливаемых конструкций.

Обобщая, можно сказать, что методами расчета, изложенными в справочной литературе, не получится оценить расчетные параметры, например, колонны квадратного сечения, армированной одинаковым количеством стержней арматуры с каждой стороны, усиленной предварительно напряженными распорками по углам сечения и находящейся в состоянии косоугольного внецентренного сжатия. А ведь подобного рода конструкции в настоящий момент являются довольно распространенными в практике строительства.

По этой причине, в данной заметке ставится задача продемонстрировать расчет подобного элемента по нелинейной деформационной модели (НДМ), описанной в СП 63.13330.2012.

При этом следует учитывать, что и в случае использования НДМ, все конструктивные требования, изложенные в справочной и нормативной литературе по усилению, обязательны при реализации проектных решений.



РАСЧЕТНАЯ СХЕМА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО СЖАТОГО ЭЛЕМЕНТА, УСИЛЕННОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫМИ РАСПОРКАМИ

а - распорки с изломом ветвей перед включением в работу; б - распорки без излома ветвей; в - расчетная схема усилий в сечении элемента.

1 - усиливаемый элемент; 2 - предварительно напряженные распорки; 3 - поперечные планки; 4 - база распорок; 5 - приспособления для включения распорок в работу.

Рисунок 1.1. Усиление колонны предварительно напряженными распорками

2. Постановка задачи и некоторые расчетные предпосылки

Для сравнения предлагается рассмотреть пример из «Рекомендаций по усилению монолитных железобетонных конструкций зданий и сооружений предприятий горнодобывающей промышленности».

Усиление внецентренно-сжатой колонны с малым эксцентриситетом предварительно-напряженными распорками

Требуется: рассчитать и запроектировать усиление внецентренно-нагруженной колонны с малым эксцентриситетом сечением $b \times h = 40 \times 60$ см, армированной сталью класса А-II с $R_a = 2700$ кг/см²; $F_a = 3 \text{ } \varnothing 25 - 14,7$ см²; $F'_a = 3 \text{ } \varnothing 18 - 7,63$ см²; бетон марки 200; $R_n = 100$ кг/см²; $R_{пр} = 80$ кг/см²; $a = a' = 4$ см; $a'' = 3$ см; $h_0 = 56$ см; колонна юбчатая, $l = 7,5$ м

После реконструкции колонна должна воспринимать нагрузку $N_{дл} = 220$ т; $N_{к} = 0$; $M_{дл} = 20$ тм; $M_{к} = 3,5$ тм.

Но сперва стоит определиться с расчетными предпосылками для данного типа усиления:

– усиление в виде предварительно напряженных распорок рассчитывается совместно с усиливаемым железобетонным элементом. Совместность их работы достигается предварительным напряжением элементов усиления.

ВАЖНО: в случае применения подобного типа усиления, требуется четко определить схему работы конструкции. Уголки могут выступать как в роли металлической обоймы, так и в роли предварительно напряженных распорок. От этого зависит, каким образом будет рассчитываться усиление.

– растянутые распорки в работе усиленной конструкции не участвуют. Как правило, узлы распорок проектируются так, что они не обеспечивают «анкеровку» на растягивающие усилия (рисунок 1.1) – опорные базы данных элементов работают только на сжатие и выполняются, как правило, без анкерных болтов.

ПРИМЕЧАНИЕ: в технической литературе по усилению (в частности, в справочнике под редакцией Мальганова и в «Рекомендациях»), данное условие сформулировано иным образом – не учитывается работа распорок, расположенных в растянутой зоне. На мой взгляд, условие сформировано «в запас» - при использовании метода предельных усилий сложно определить фактические напряжения в распорке с учетом предварительного напряжения и «позднего» включения в работу. Потому для упрощения считается, что если распорка находится в растянутой зоне сечения, то из работы она исключается, вне зависимости от фактических напряжений. В данном примере, распорка исключается из работы именно по достижению растягивающих напряжений; впрочем, выбор характера работы элемента всегда остается за инженером

Таким образом, при описании работы элементов усиления в составе нелинейной деформационной модели железобетонного сечения, следует учитывать следующие факторы:

– при достижении растягивающих усилий в элементах распорок напряжения в них следует принимать нулевыми;

– требуется учитывать величину предварительного напряжения материала – оно обеспечивает совместную работу конструкции и элемента усиления;

– кроме того, требуется учитывать, что элементы усиления начинают работать не одновременно с усиливаемым элементом (в момент строительства), а только в момент ремонта/реконструкции, то есть тогда, когда в усиливаемая конструкция уже «набрала» определенные деформации.

ПРИМЕЧАНИЕ: важно помнить, что для бетона характерна упруго-пластическая работа (при использовании трехлинейной диаграммы, пластические деформации наступают при достижении величины напряжений $0,6R_b$, см. п. 6.1.20 СП 63.13330.2012). В этой связи, деформации сечения при нагружении и последующей разгрузке будут больше, нежели при первоначальном нагружении меньшей нагрузкой. Однако, в виду отсутствия в нормативных документах информации о работе бетона

при разгрузке и повторном нагружении, фактор «истории загрузки» не учитывается.

Следовательно, в рамках совместных расчетов, для элементов усиления характерны как преднапряжение, обеспечивающее совместность работы, так и «недонапряжение»¹, обусловленное «поздним» включением элемента в работу.

Если с учетом первых двух факторов проблем не возникает, то учет последнего фактора – дело чуть более сложное. Дело в том, что элементы усиления в момент его включения должны «подстроиться» под деформации элементов усиливаемого сечения.

Для того, чтобы можно было учесть данный фактор на практике, требуется знать величины усилий в элементе на момент реконструкции или ремонта. При известных усилиях не составит труда оценить параметры начальных деформаций сечения.

Например, принимаем, что для рассматриваемого элемента, величина продольной силы на момент усиления составит $N = 100$ тс, $M = 15.7$ тс·м (величина изгибающего момента была определена из величины эксцентриситета с учетом продольного изгиба; эксцентриситет принимаем постоянным для всех стадий работы конструкции).

Величины деформаций в углах сечения при действии данной комбинации усилий, показаны на рисунке ниже.

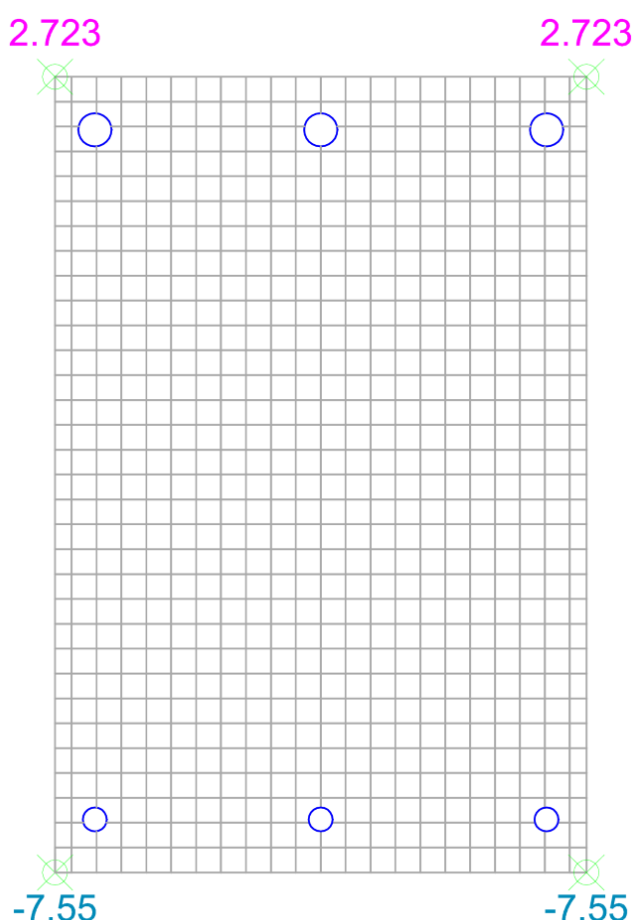


Рисунок 2.1. Величины относительных деформации в углах сечения, увеличенные в 10^4 раз.

¹ Условный термин для иллюстрации

Базовой предпосылкой расчета железобетонных конструкций, является гипотеза плоских сечений – сечение после деформации остается плоским и относительные деформации по сечению распределяются равномерно, в виде плоскости.

Для такой плоскости, которая будет определять распределение деформаций по сечению в момент усиления, возможно найти уравнение по трем точкам. Каноническое уравнение плоскости можно записать в виде¹:

$$Ax + By + Cz + 1 = 0,$$

где A, B, C - коэффициенты;

x, y - координаты точек на плоскости;

z - координата точки в пространстве, в данном случае, она будет выступать в роли относительной деформации в соответствии с рисунком 2.2

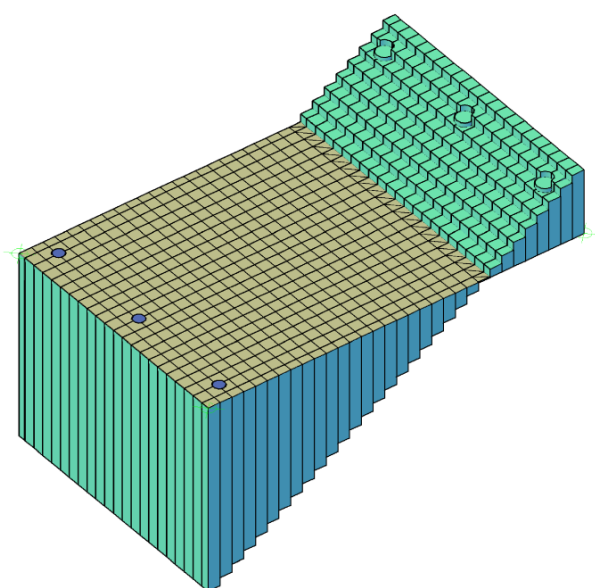


Рисунок 2.2. Распределение деформации по сечению – в виде плоскости

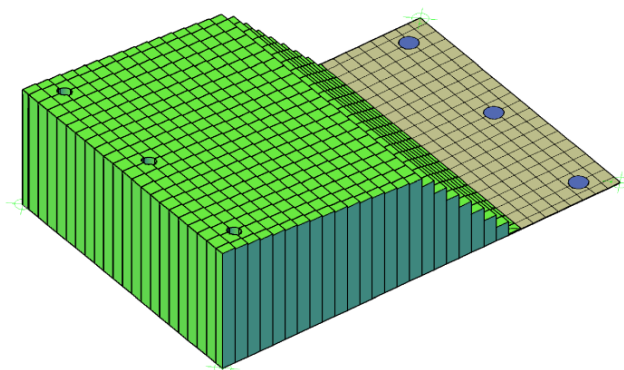


Рисунок 2.3. Распределение напряжений в бетоне по сечению - нелинейное распределение

Для определения коэффициентов, используем известные координаты (x, y, ε) – эти величины определяются при расчете исходного сечения элемента на усилия в момент усиления (рисунок 2.1). Для данной задачи был использован SMath, процесс вычисления показан ниже:

¹ На самом деле, можно было сделать несколько проще (правда, сразу не сообразил). Зная параметры деформации сечения от начальных нагрузок ($\varepsilon_0, 1/r_x, 1/r_y$), можно определить деформации в любой точке сечения по формулам (8.29)-(8.30) СП 63.13330.2012.

$$\begin{aligned}
x_1 &:= 0 & x_2 &:= 0 & x_3 &:= 400 \\
y_1 &:= 0 & y_2 &:= 600 & y_3 &:= 600 \\
z_1 &:= \frac{-7.55}{10000} & z_2 &:= \frac{2.723}{10000} & z_3 &:= \frac{2.723}{10000} \\
f_1(A, B, C) &:= A \cdot x_1 + B \cdot y_1 + C \cdot z_1 + 1 \\
f_2(A, B, C) &:= A \cdot x_2 + B \cdot y_2 + C \cdot z_2 + 1 \\
f_3(A, B, C) &:= A \cdot x_3 + B \cdot y_3 + C \cdot z_3 + 1 \\
R &:= \text{roots} \left(\begin{bmatrix} f_1(A, B, C) \\ f_2(A, B, C) \\ f_3(A, B, C) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0023 \\ 1324.5033 \end{bmatrix} \\
f_1(0, -0.0023, 1324.5033) &= 0
\end{aligned}$$

Таким образом, для рассчитываемого сечения, при действии указанных усилий, уравнение относительной деформации в произвольной точке можно записать в виде:

$$-0.0023 \cdot y + 1324.5033 \cdot \varepsilon + 1 = 0$$

Тогда зависимость относительной деформации элемента от координаты в виде:

$$\varepsilon(x, y) = \frac{0.0023y - 1}{1324.5033}$$

Как можно заметить, относительная деформация зависит только лишь от одной координаты y , что и неудивительно, учитывая, что сечение находится в состоянии одноосного внецентренного сжатия, как показано на рисунке 2.2.

Полученная зависимость дает возможность учесть начальные деформации сечения, достигнутые им до момента усиления. Для элементов усиления, начальные напряжения («предварительное напряжение»), могут быть определены по следующей формуле:

$$\sigma_0 = -\varepsilon(x, y)E + p$$

где $\varepsilon(x, y)$ - уравнение плоскости деформаций сечения в момент усиления;

E - модуль упругости элементов усиления;

p - величина предварительного напряжения, создаваемая для включения конструкции усиления в работу.

В макросе НДМ <https://dwg.ru/dnl/13011> полученную величину требуется вводить в ячейки «пользовательского материала», которые определяют напряжения в материале, коэффициенты упругости и относительные деформации с учетом предварительного напряжения.

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
osj	ouk	ospm	vbi	vsi	vuk	vspm	vbi=1	vsi=1	vuk=1	vspm=1	g	εuk+p	εspm+p	γup	γsp		
	0.00				0.0000				1		78.5	4.31E-05		1		0.00	
	0.00				0.0000				1		78.5	3.7E-05		1		0.00	
	0.00				0.0000				1		78.5	3.1E-05		1		0.00	

Рисунок 2.4. Учет начальных напряжений в Excel файле расчета

Более наглядно это видно в приложенном Excel-файле¹, а в рамках заметки в блоге, хотелось бы остановиться на наглядной иллюстрации работы подобного сечения.

Допустим, рассматривается то же самое сечение, без усиления, в момент, когда в нем действуют усилия $N = 100$ тс, $M = 15.7$ тс×м. В качестве удобного и наглядного индикатора будем использовать напряжения в сжатой арматуре.

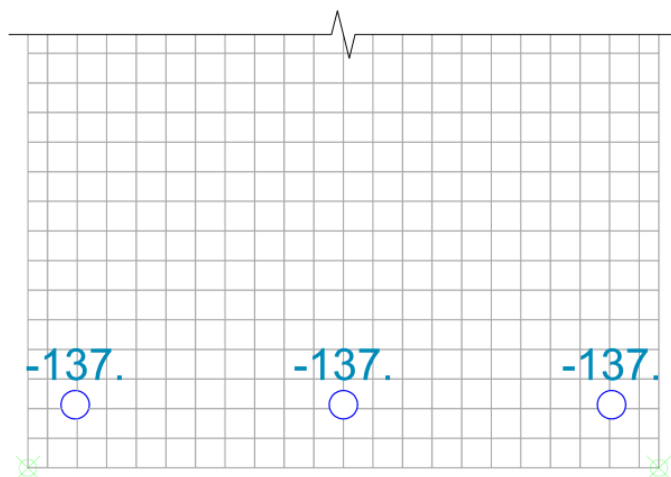


Рисунок 2.5. Исходная ситуация: напряжения в арматуре сжатой грани при $N = 100$ тс, $M = 15.7$ тс×м

Добавляем элементы усиления в схему. Первоначально, не вводим дополнительные начальные напряжения, обусловленные исходной деформацией элемента до усиления и предварительным напряжением, расчет ведем на те же усилия.

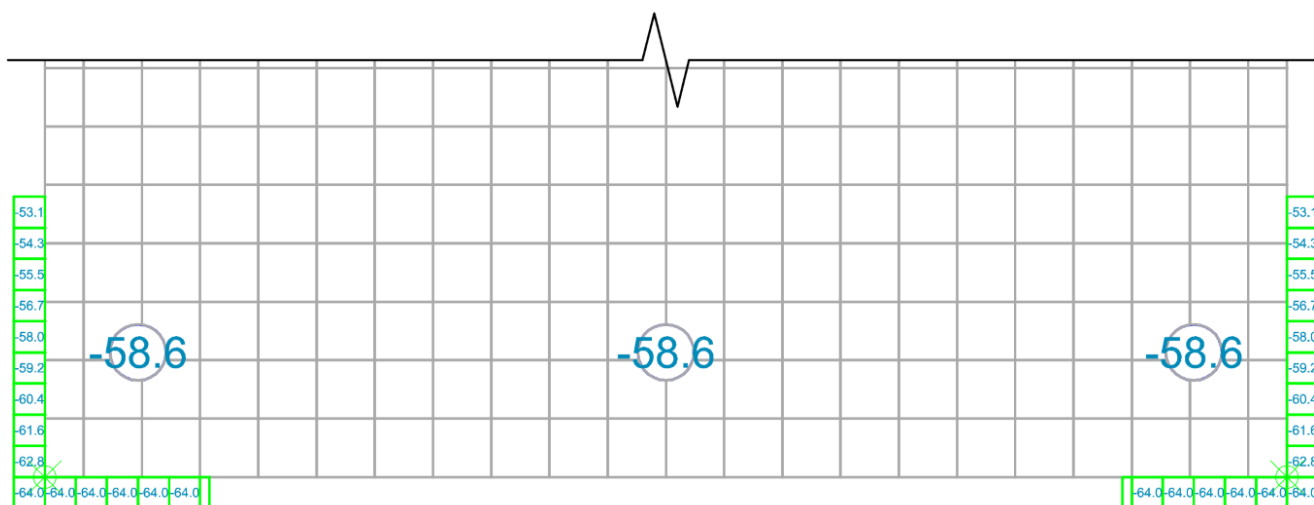


Рисунок 2.6. Напряжения в арматуре и в пользовательском материале при учете элементов усиления

Полученный результат не является корректным в рамках рассматриваемой задачи – работа уголков учитывается с самого начала, поэтому напряжения в сжатой арматуре при тех же внешних нагрузках сильно уменьшились: 58.6 МПа вместо исходных 137 МПа.

Тогда для пользовательского материала добавляем компонент $\varepsilon(x, y)E$, но пока без предварительно напряжения – это будет соответствовать ситуации, что элементы

¹ В приложенном Excel-файле, для всех измененных ячеек добавлен комментарий

усиления просто установили, но в работу их не включили, не создав предварительного напряжения (просто «приставили» уголки к нагруженной колонне).

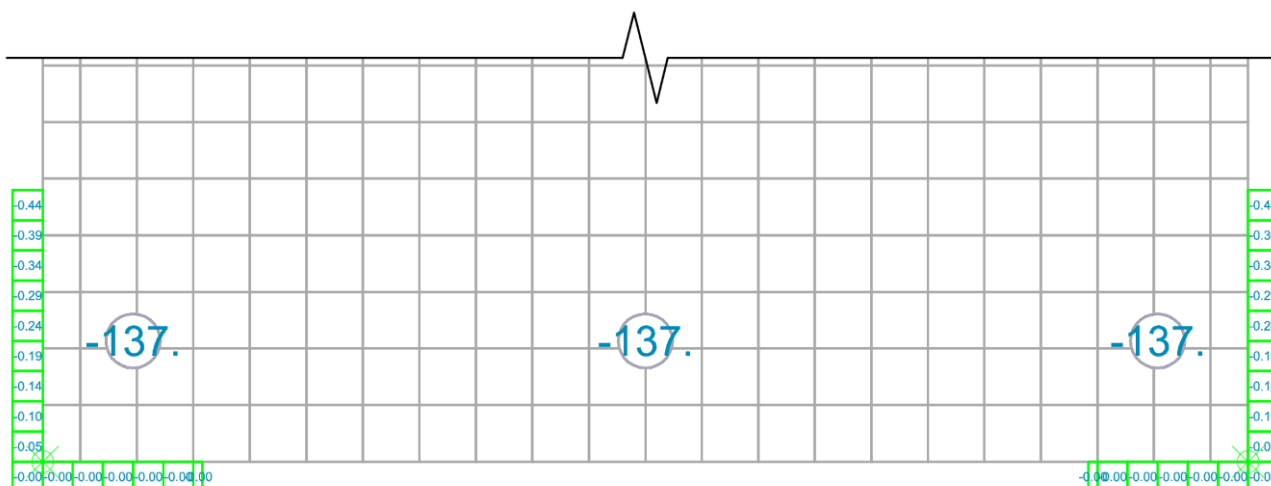


Рисунок 2.7. Напряжения в арматуре и в пользовательском материале при учете элементов усиления и начальных деформаций

В этом случае, получившиеся результаты более соответствуют условиям задачи – напряжения в арматуре не изменились, напряжения в уголках остаются нулевыми¹: если нагрузка не увеличивается, материал усиления не работает.

Добавляем величину предварительного напряжения, указанного в примере из «Рекомендаций» $p = 945 \text{ кгс/см}^2 \approx 92.68 \text{ МПа}$.

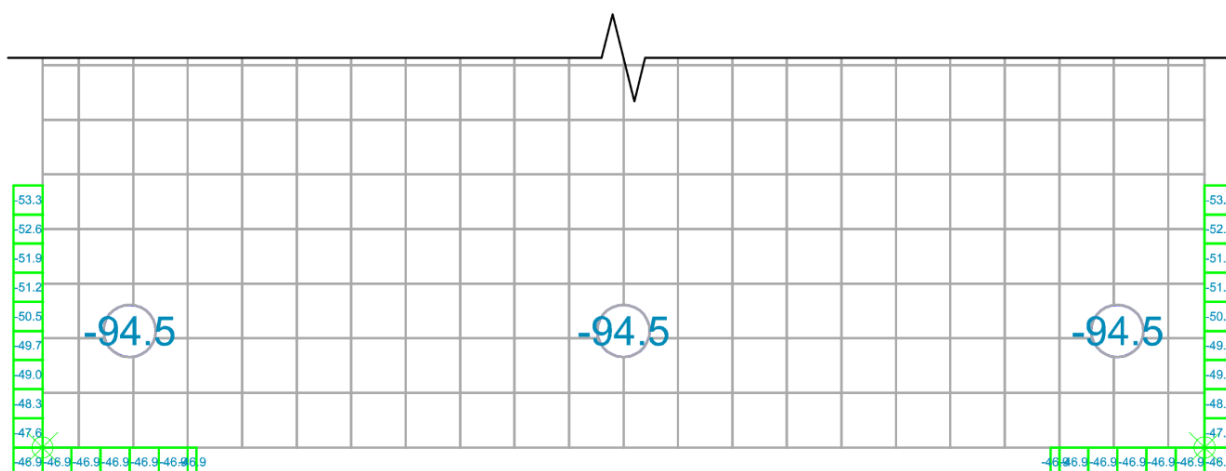


Рисунок 2.8. Напряжения в арматуре и в пользовательском материале при учете элементов усиления, начальных деформаций и предварительного напряжения распорок

Теперь, величина напряжений в сжатой арматуре снижается (элементы усиления берут на себя часть внешней нагрузки за счет предварительного напряжения, разгружая сечение), попутно снижается и предварительное напряжение в самих уголках (в среднем $\approx 50 \text{ МПа}$ в отличие от первоначальной величины преднапряжения $\approx 92.68 \text{ МПа}$).

¹ Несущественные величины напряжений в элементах уголков (менее $0,5 \text{ МПа}$), связаны с конечной точностью промежуточных вычислений

Также на рисунке ниже показаны напряжения в уголках у растянутой грани сечения – как было указано выше, в методике, изложенной в справочной литературе, рекомендуется не учитывать их работу в составе сечения.

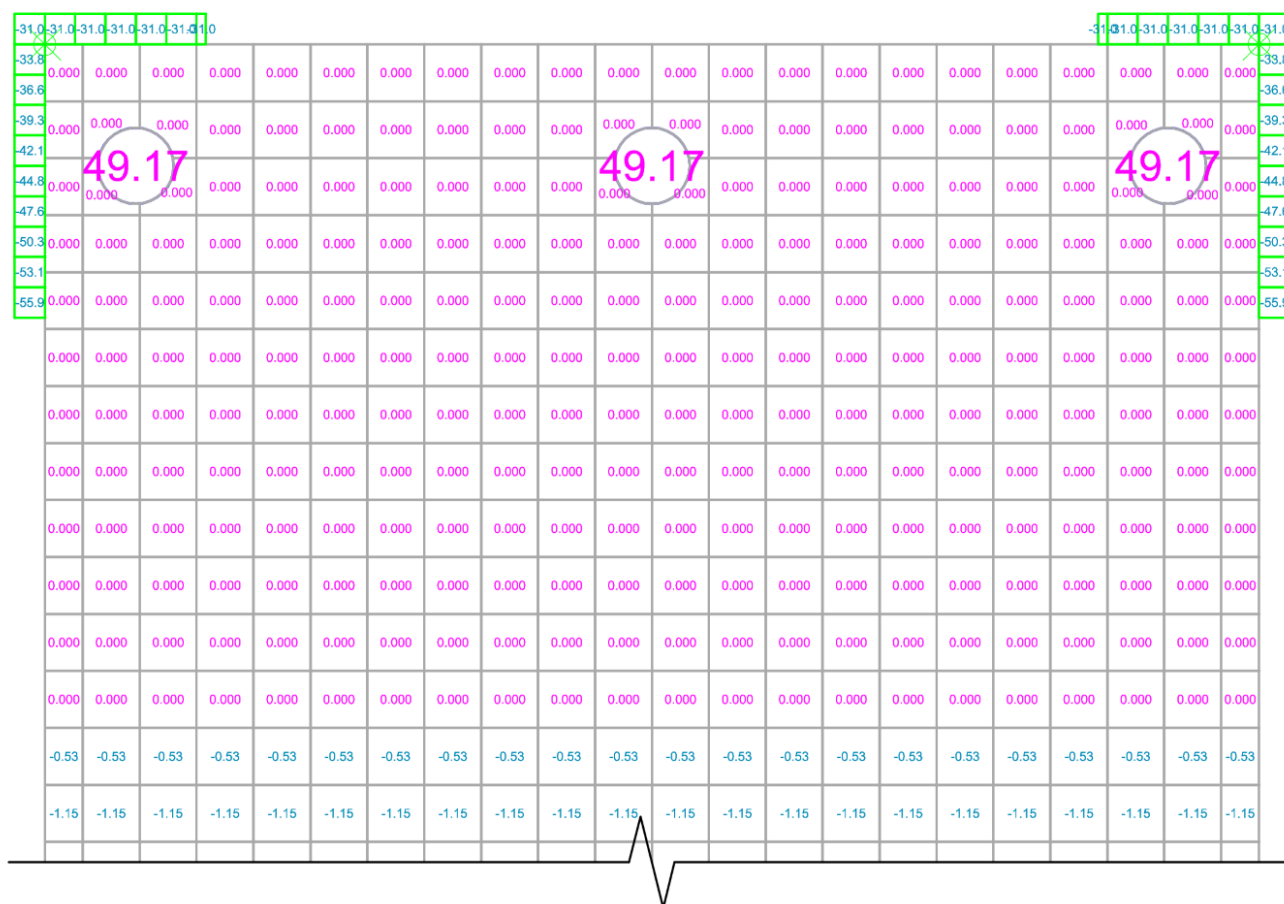


Рисунок 2.9. Напряжения у растянутой грани сечения, МПа

Как видно из рисунка 2.9, сжимающие напряжения в уголках у растянутой зоны сечения после включения их в работу, не нулевые, хотя и существенно ниже первоначальной величины предварительного напряжения: $\approx 35\text{--}40$ МПа против ≈ 92.7 МПа. В таком случае, решение об учете их в работе сечения инженер может принимать самостоятельно.

Для оценки корректности расчетной модели, требуется сравнить несущую способность усиленного элемента по методике «Рекомендаций...» и НДМ-расчету. Несущая способность усиленной колонны по «Рекомендациям» составит $N = 2162.2$ кН (величину эксцентриситета оставляем постоянной):

2. Определяем необходимую площадь поперечного сечения распорки, устанавливаемой в сжатой зоне колонны. Для распорки принимаем уголковую сталь Ст3:

$$F_0 = \frac{N e - 0,4 R_{\text{н}} b h_0^2 - R_a F'_a (h_0 - a')}{m_0 R_a (h_0 - d'')} =$$

$$= \frac{227\,000 \cdot 41,7 - 0,4 \cdot 100 \cdot 40 \cdot 56^2 - 2700 \cdot 7,63 (56 - 4)}{0,9 \cdot 2100 (56 - 3)} =$$

$$= 33,78 \text{ см}^2.$$

Принимаем 2 L 100×63×10; $F_0 = 31 \text{ см}^2$.

$$N := \frac{F_0 \cdot m_0 \cdot R_a (h_0 - a'') + 0,4 \cdot R_{\text{н}} \cdot b \cdot h_0^2 + R_a \cdot F'_a (h_0 - a')}{e} = 2162,1951 \text{ кН}$$

В ходе расчета по НДМ получена величина продольной силы $N = 2330 \text{ кН}$ с коэффициентом использования $k_n = 1.001$ по предельным деформациям бетона. Полученная разница составляет 7.8% и, учитывая различные методики расчета, такую разницу можно признать допустимой.

Если обратить внимание на структуру формул из «Рекомендаций» и справочника Мальганова, то видно, что ни величина предварительного напряжения, ни параметры НДС конструкции на момент усиления, не влияют на несущую способность элемента с усилением¹.

3. Оценка влияния предварительного напряжения в распорках и момента включения усиления в работу

Но, конечно, определенное влияние данных параметров на работу усиливаемого элемента есть: во всех нормативных и справочных документах по ремонту или реконструкции, рекомендуют максимально разгружать строительные конструкции перед усилением. Кроме того, распорки должны обязательно быть с предварительным напряжением – это обеспечивает включение элемента в работу.

Поэтому, для оценки влияния данных факторов, построим графики зависимости некоторых величины, характеризующих работу сечения железобетонного элемента.

При этом принимаем, что действующая величину продольной силы составит $N = N_{ult} / 1.15 = 2330 / 1.15 = 2026 \text{ кН}$. Величина эксцентриситета $e = 0.157 \text{ м}$ остается постоянной, из неё получаем величину изгибающего момента $M = 318 \text{ кН} \cdot \text{м}$.

В качестве первого параметра, оцениваем напряжения в растянутой арматуре, от которых напрямую зависит трещиностойкость конструкции.

¹ Тоже самое справедливо и при расчетах по НДМ и было показано в прошлой заметке: <https://dwg.ru/b/igos/236>

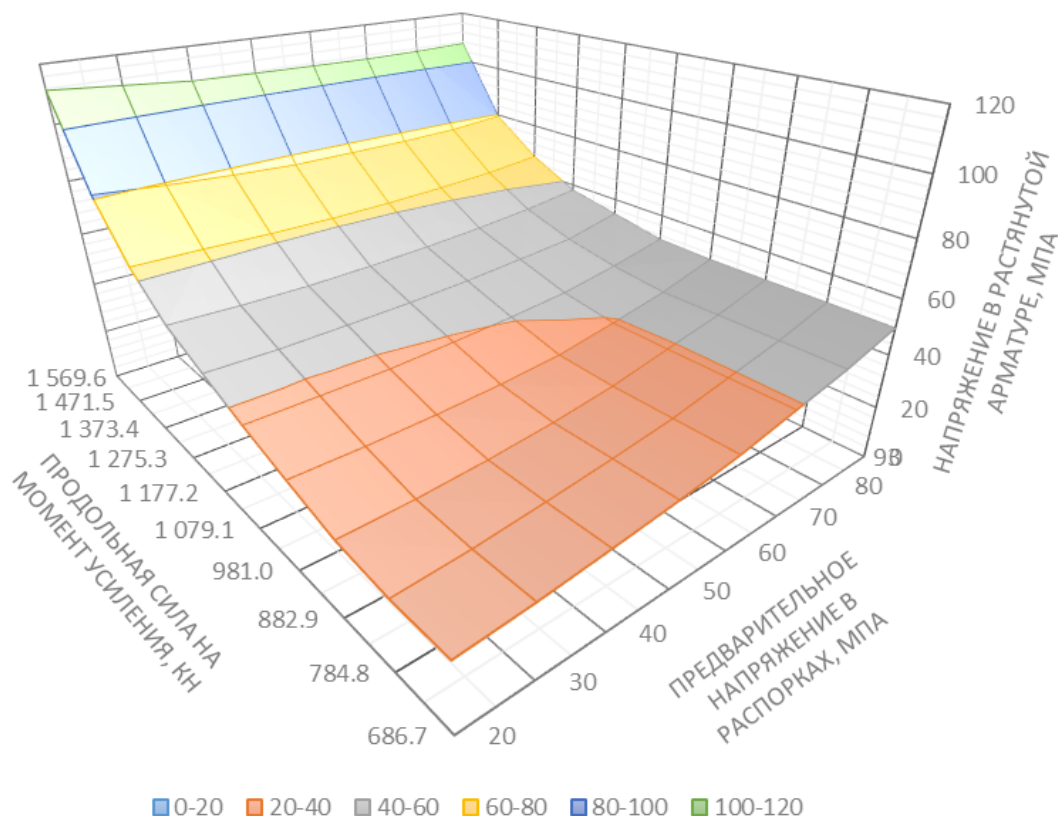


Рисунок 3.1. Зависимость напряжений в растянутой арматуре от продольной силы на момент усиления, а также от предварительного напряжения в распорках

Для напряжений в растянутой арматуре, видно, что наиболее существенно на них влияет величина нагрузки на момент усиления элемента. Если усилия в колонне в момент усиления велики, то и напряжения в арматуре будут существенно больше.

Влияние же предварительного напряжения в распорках не столь существенно – при небольших величинах внешней нагрузки в момент усиления, напряжение в растянутой арматуре начинает увеличиваться при увеличении преднапряжения в распорках. При средних величинах внешних нагрузок роста напряжений в арматуре с ростом величины предварительного напряжения практически не происходит, а когда элемент усиливается при нагрузках, близких к рабочим, напряжения в арматуре будут достигать максимальных значений при минимальной величине преднапряжения.

Минимальная величина напряжений в арматуре достигается при «раннем» включении усиления в работу (внешние нагрузки относительно невелики) и при минимальном предварительном напряжении распорок.

Максимальная величина достигается при «позднем» включении усиления в работу, когда нагрузки практически равны рабочим и, опять же, при минимальном предварительном напряжении распорок.

Далее приводятся аналогичные графики изгибной жесткости и кривизны сечения в зависимости продольной силы на момент усиления, а также от предварительного напряжения в распорках.

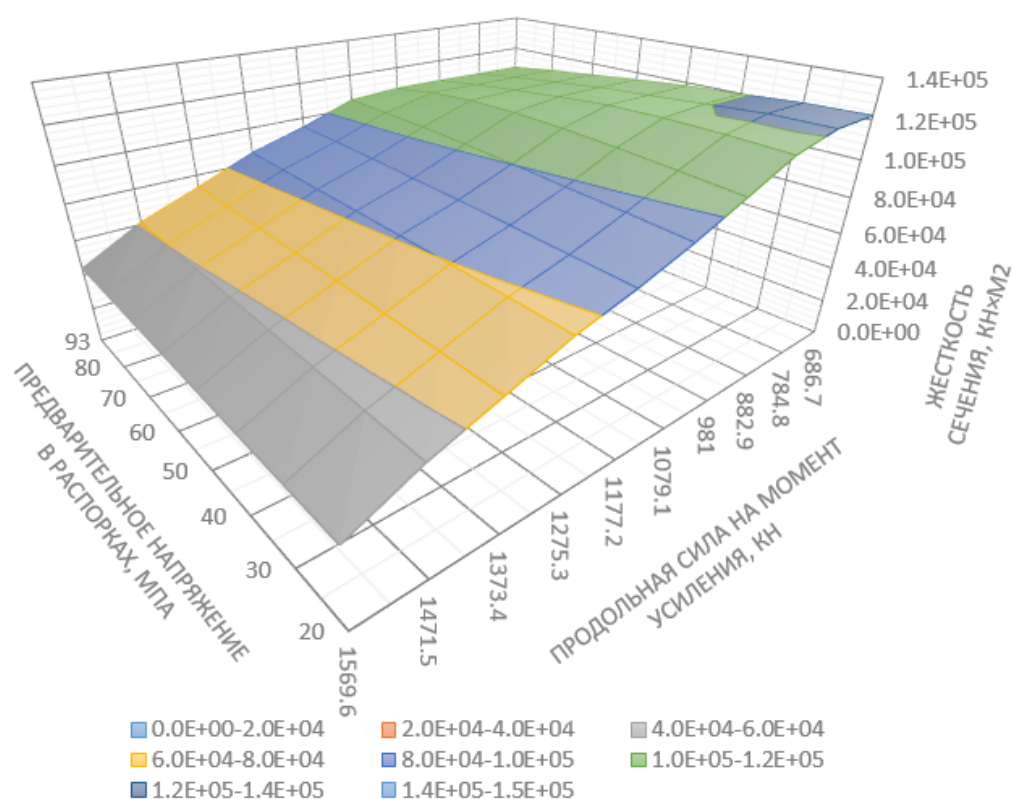


Рисунок 3.2. Зависимость изгибной жесткости¹ сечения от продольной силы на момент усиления, а также от предварительного напряжения в распорках

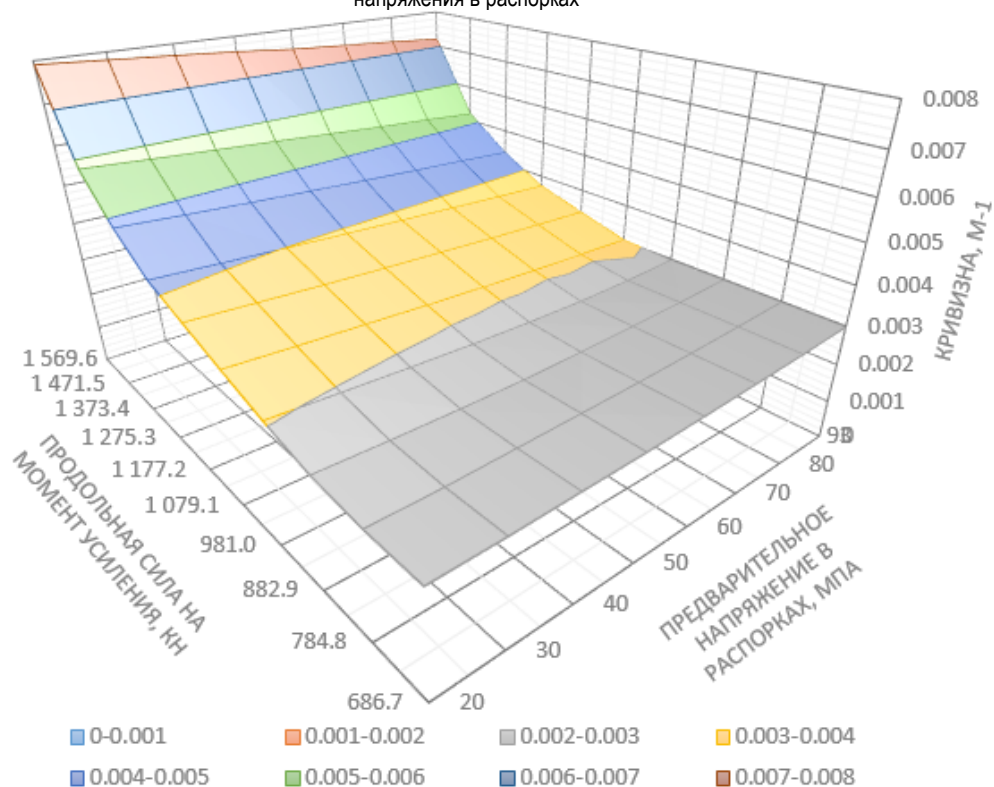


Рисунок 3.3. Зависимость кривизны от продольной силы на момент усиления, а также от предварительного напряжения в распорках

¹ Изгибная жесткость определяется по формуле $D = \frac{M}{(1/r)}$

Жесткость сечения существенно снижается в случае, когда нагрузки на момент усиления близки к рабочим (а кривизна, напротив, увеличивается). Сечение успевает набрать существенные деформации до включения усиления в работу, которое эффективно работает только на небольшом отрезке от момента усиления до достижения рабочей нагрузки.

Максимальная величина жесткости достигается при небольших усилиях на момент реконструкции и минимальных предварительных напряжениях в распорках.

Минимальная величина – при значительных нагрузках на момент усиления и минимальных предварительных напряжениях в распорках.

В данном случае интересно то, что при небольших внешних нагрузках на момент усиления, увеличение предварительного напряжения в распорках приводит к небольшому снижению жесткости сечения, а также к некоторому увеличению напряжений в растянутой арматуре. Если построить график зависимости площади растянутого бетона сечения, то это объяснимо – большая величина предварительных напряжений в распорке увеличивает площадь растянутого бетона, исключая его из работы и снижая жесткость сечения.

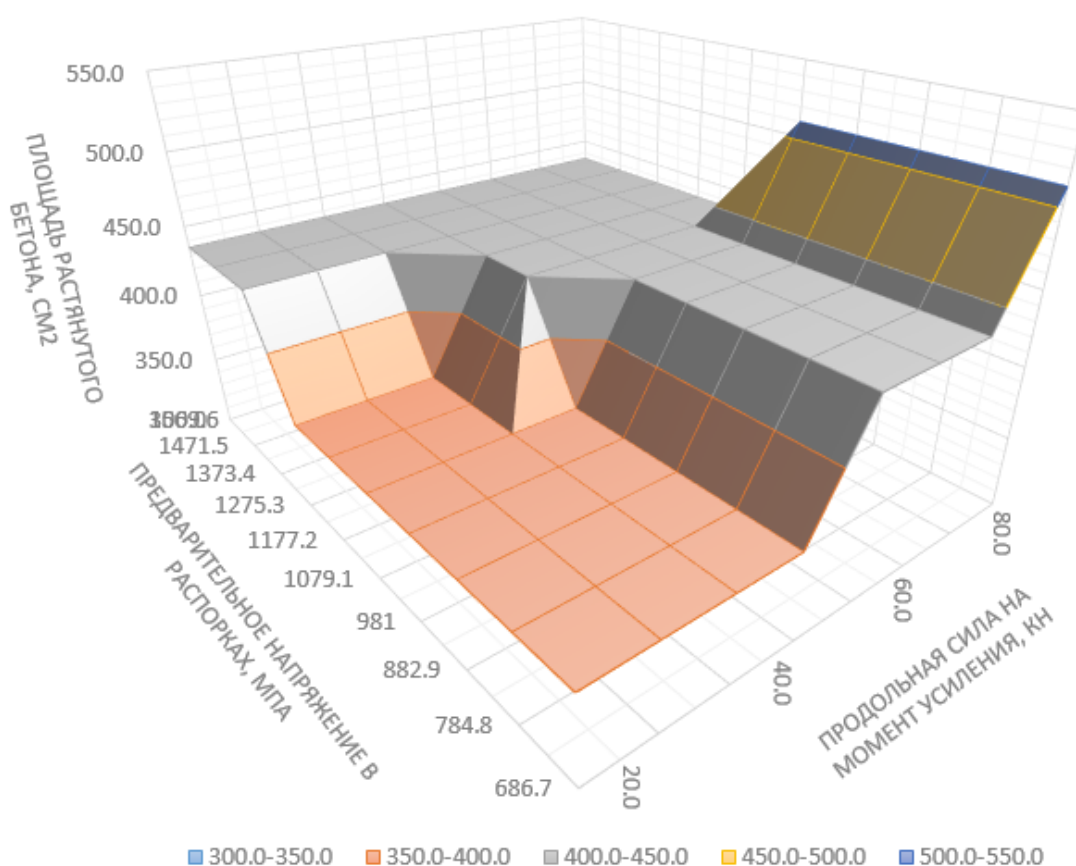


Рисунок 3.4. Зависимость площади растянутого бетона от продольной силы на момент усиления, а также от предварительного напряжения в распорках

4. Выводы

На основании рассмотренного примера, можно сделать некоторые выводы:

1. При расчетах несущей способности колонны, усиленной предварительно напряженными распорками, результаты вычислений по НДМ и МПУ показывают довольно близкие результаты. В отличие от МПУ, НДМ более универсален и дает возможность оценить параметры сечения с произвольным армированием и при произвольной напряженно-деформированном состоянии.

2. Еще одним достоинством НДМ является то, что есть возможность количественного определения величин, необходимых для расчетов по второй группе предельных состояний, в частности, напряжений в растянутой арматуре при проверке трещиностойкости.

3. Кроме того, есть возможность учета специфических факторов для данного типа усиления: предварительного напряжения в распорках, а также уровня «загрузки» элемента на момент усиления.

4. Оба этих фактора практически не влияют на несущую способность усиленного сечения, зато влияют на параметры для расчетов по второй группе предельных состояний: напряжения в арматуре, кривизну и параметры жёсткости сечения. Жесткость сечения, кроме того, влияет и на распределение усилий в статически неопределимых системах¹.

5. С учетом того, что величины предварительного напряжения распорок несущественно влияют на эксплуатационные параметры сечения, при назначении данного параметра в процессе проектирования усиления стоит придерживаться рекомендаций, которые приводятся в технической и справочной литературе (например, $\approx 60-80$ МПа согласно [3], либо исходя из устойчивости уголка на момент монтажа [1]). Это обеспечит надежное «включение» распорки в работу.

6. Более существенно на эксплуатационные параметры сечения элемента влияет то, насколько элемент загружен во время реконструкции. Общей рекомендацией является это обеспечение максимально возможной разгрузки элемента на время усиления.

Список литературы

1. «Рекомендации по усилению монолитных железобетонных конструкций зданий и сооружений предприятий горнодобывающей промышленности», Москва, 1974 г.
2. Мальганов А.И., Плевков В.С., Полищук А.И. «Восстановление и усиление строительных конструкций аварийных и реконструируемых зданий. Атлас схем и чертежей». Томск, 1990 г.
3. Онуфриев Н.М. «Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений», Ленинград, 1965 г.

¹ Хотя и понятно, что требование СП 63.13330.2012 «в статически неопределимых конструкциях учитывать перераспределение усилий в элементах системы вследствие образования трещин и развития неупругих деформаций в бетоне и арматуре» несколько утопично для реальных проектов