

3. По  $\bar{\lambda}$  и  $m_{ef}$  найти значение коэффициента  $\varphi_e$  и вычислить требуемую площадь сечения:

$$A_{тр} = N / (\varphi_e R_y \gamma_c).$$

Ширина сечения колонны  $b$  определяется из условия равноустойчивости колонны относительно осей  $x-x$  и  $y-y$ :

$$\varphi_e = c \varphi_y.$$

4. Определив предварительно параметр  $c$ , найти  $\varphi_y = \varphi_e / c$ , соответствующее ему значение  $\lambda_y$  и вычислить

$$i_y^{TP} = I_{ef,y} / j_y.$$

Требуемая ширина сечения

$$b_{тр} = i_y^{TP} / \alpha_y.$$

Далее компонуют сечение стержня колонны, распределяя площадь  $A_{тр}$  наивыгоднейшим образом и обеспечивая при этом местную устойчивость элементов сечения. После компоновки сечения вычисляются его геометрические характеристики, проверяется устойчивость стержня в обеих плоскостях и местная устойчивость полок и стенки.

Приведенная последовательность подбора сечений сплошных внецентренно сжатых элементов позволяет обеспечить равноустойчивость их в двух плоскостях и дает возможность получить приемлемое решение в первом же приближении без дополнительных перерасчетов.

УДК 624.014.072.2

Н.Н.МУРАШКО

### О НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УЗЛОВ СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ПРОДОЛЬНЫМИ РЕБРАМИ

В статье на основе разработанной автором методики аналитического решения контактной задачи и исследования напряженно-деформированного состояния узла с продольными ребрами [1] приводится инженерный метод определения несущей способности металлических цилиндрических оболочек, испытывающих местные давления через конструктивные элементы.

Рассмотрим случай нагружения шарнирно опертой по торцам оболочки трубы через нерадиально поставленные продольные ребра (рис. 1). Парные параллельные ребра, поставленные по образующим цилиндрической оболочки, находят широкое применение в узлах строительных и технологических конструкций, воспринимающих силовые воздействия. Так, конструкции опор вертикальных и горизонтальных цилиндрических аппаратов представля-

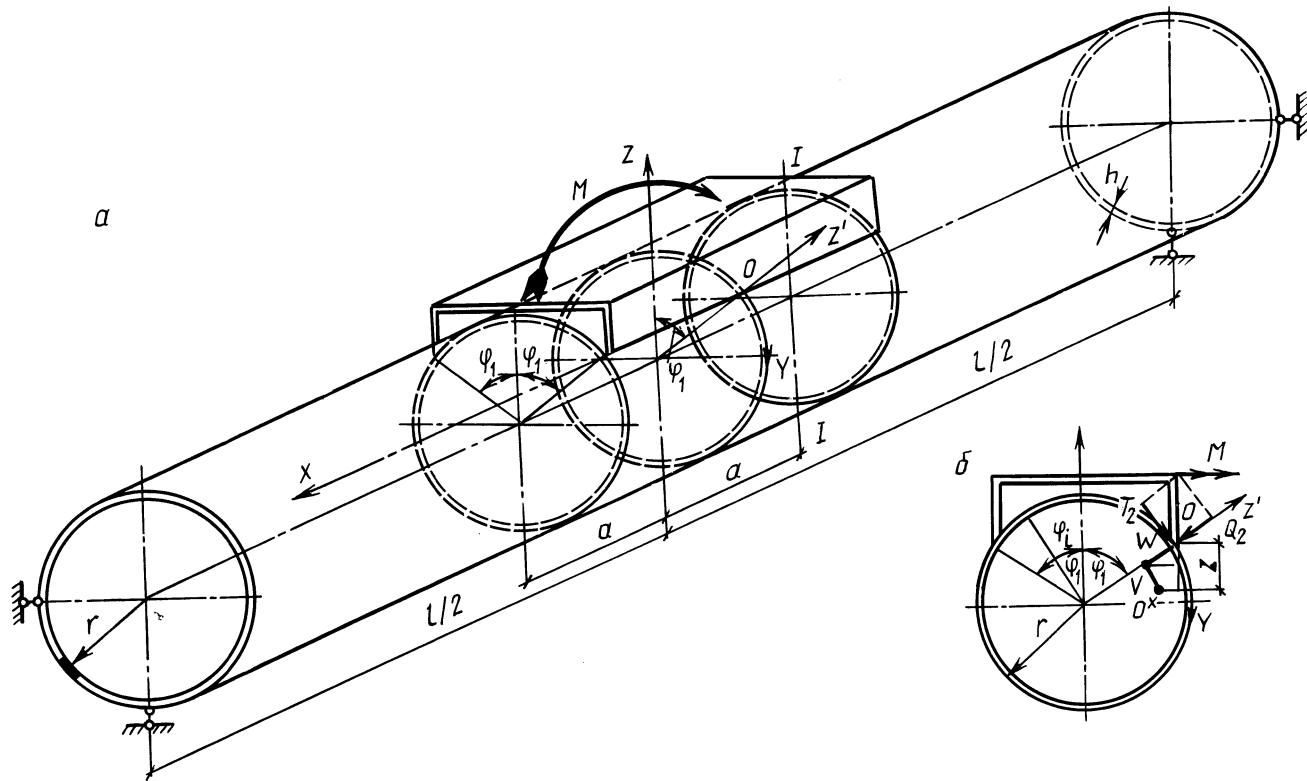


Рис. 1. Локальное нагружение оболочки-трубы через столик из швеллера:

*a* — расчетная схема; *б* — схема перемещений точек контакта, соответствующих радиальной и тангенциальной составляющим нагрузки в сечении I—I

ют собой парные продольные ребра нерадиального направления, передающие реакцию на боковую стенку в виде узлового продольного момента, продольного и тангенциального усилий.

Как видно из табл. 1, краевое максимальное напряжение  $\sigma_{i0} + \sigma_{iu}$  при  $\theta_2 = 1$  намного превышает предел текучести стали  $\sigma_T$ , и поэтому исчерпание упругой работы цилиндрической оболочки при локальном ее нагружении происходит при сравнительно малых перемещениях ребер  $(0,1...0,2h)$ , что позволяет использовать геометрически линейную теорию оболочек. Вместе с тем высокий коэффициент концентрации напряжений обуславливает сравнительно раннее появление текучести (физическую нелинейность) при нагрузке, составляющей по данным экспериментов всего 30...40 % от разрушающей.

Ввиду сложности решения контактной задачи для оболочки с учетом ее физической нелинейности предлагается приближенная оценка несущей способности оболочки в предположении "псевдоупругого характера ее работы" до мгновенного образования пластических шарниров в сечениях, расположенных в зоне концентрации напряжений. Это состояние оболочки и будем принимать в качестве предельного по несущей способности, хотя, как показывают эксперименты, она располагает дополнительным резервом прочности при значительных прогибах и необратимых деформациях.

Условие псевдоупругой работы оболочки может быть описано теорией Прагера—Кунце или близкой к ней теорией образования полного пластического шарнира в сечении  $l-l$ :  $\sigma_{i0} + 2/3 \sigma_{iu} = \sigma_T - \sigma_{0i}$ , где  $\sigma_{0i}$  — основное напряжение в оболочке (от внутреннего давления или продольной нагрузки). Тогда в зависимости от напряженного состояния в узле оболочки максимальное краевое напряжение  $\sigma_i = \sigma_{i0} + \sigma_{iu} + \sigma_{0i}$  превысит  $\sigma_T$ :

$$\sigma_i = (1 + k_j) / (2/3 + k_j) (\sigma_T - \sigma_{0i}) + \sigma_{0i} . \quad (1)$$

Принимая вместо  $\sigma_T$  определяемое выражением (1)  $\sigma_i$ , можно учесть влияние локальной области концентрации напряжений и двухосного однозначного напряженного состояния цилиндрической оболочки на развитие пластичности:

$$\bar{\sigma}_i = 1,2 (1 + k_j) / (2/3 + k_j) \sigma_T (1 - \sigma_{0i} / \sigma_T) + \sigma_{0i} .$$

Таким образом,  $\bar{\sigma}_i - \sigma_{0i}$  будет определять краевое дополнительное напряжение от узлового момента  $M$ . Если вычислить  $M_0$  при  $\sigma_{0i} = 0$ , несущая способность узла цилиндрической оболочки  $M = 1,2 M_0 (1 - \sigma_{0i} / \sigma_T)$ . Расчетная несущая способность узла составит

$$M = M_0 (1 - \sigma_{0i} / \sigma_T) , \quad (2)$$

так как расчетное сопротивление стали  $R \approx \sigma_T / 1,2$ .

Чтобы определить  $M_0$ , табличные данные  $M$  умножим на  $M_T / M_i \cdot 1 / (1 + 1,5k_j)$ , где  $M_T = \sigma_T h^2 / 4$ . Получим значения несущей способности цилиндрической оболочки в продольном и кольцевом направлениях только при действии условного момента. Графики изменения  $M_i / (2a)$  и жесткости узлов  $G/a$  при  $W = h = 0,5$  см для оболочки трубы  $\varnothing 219 \times 5$  мм приведены на рис. 2. Из графиков

Табл. 1. Результаты решения контактных задач

| $\xi =$<br>$= a/r$ | $\varphi_1,$<br>рад | Коэффициент контактной нагрузки $B_k \cdot 10^3$ |       |        |       |       | Нагрузка (изгибающий момент), кН·м |                       | $M_i$ , кН·м            |                     |                         |                     | $T_i$ , кН              |                       |                         | $k_i = \sigma_{i0}/\sigma_{iu}$ |                         | Прогиб, см |       |           |
|--------------------|---------------------|--|-------|--------|-------|-------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------|-------|-----------|
|                    |                     | $B_0$  | $B_1$ | $B_2$  | $B_3$ | $B_4$ | $\frac{M_Q}{M_T}$                  | $M$                   | $\frac{M_{Q1}}{M_{T1}}$ | $M_1$               | $\frac{M_{Q2}}{M_{T2}}$ | $M_2$               | $\frac{T_{Q1}}{T_{T1}}$ | $T_1$                 | $\frac{T_{Q2}}{T_{T2}}$ | $T_2$                           | $k_1$                   |            | $k_2$ |           |
|                    |                     |  |       |        |       |       |                                    |                       | $\frac{M_Q}{M_T}$       | $M$                 | $\frac{M_{Q1}}{M_{T1}}$ | $M_1$               | $\frac{M_{Q2}}{M_{T2}}$ | $M_2$                 | $\frac{T_{Q1}}{T_{T1}}$ | $T_1$                           | $\frac{T_{Q2}}{T_{T2}}$ |            | $T_2$ | $k_1$     |
| 83                 | 3,3                 | 0  | 4,7   | -2,79  | 1,26  | -0,62 | 1,53                               | $\frac{77}{-}$        | 77                      | $\frac{0,08}{-}$    | 0,08                    | $\frac{0,16}{-}$    | 0,16                    | $\frac{-28,7}{-}$     | -28,7                   | $\frac{-17,1}{-}$               | -17,1                   | 0,3        | 0,09  | $w = 0,5$ |
|                    |                     | $\frac{\pi}{4}$                                  | 9,65  | -5,56  | 2,58  | -1,32 | 3,09                               | $\frac{106,1}{106,1}$ | 300                     | $\frac{0,11}{0}$    | 0,11                    | $\frac{0,23}{0}$    | 0,23                    | $\frac{-32,2}{-5,2}$  | -37,4                   | $\frac{-25,3}{-15,7}$           | -41                     | 0,28       | 0,14  |           |
|                    |                     | $\frac{\pi}{3}$                                  | 14,18 | -8,55  | 3,96  | -1,99 | 4,63                               | $\frac{104,8}{181,5}$ | 419,1                   | $\frac{0,11}{0,01}$ | 0,12                    | $\frac{0,23}{0,02}$ | 0,25                    | $\frac{-33,5}{-8,2}$  | -41,7                   | $\frac{-25,6}{-20,6}$           | -46,2                   | 0,29       | 0,15  |           |
|                    |                     | $\frac{\pi}{2}$                                  | 36,61 | -23,48 | 11,18 | -6,02 | 12,37                              | $\frac{-}{350,3}$     | 700,6                   | $\frac{-}{0,05}$    | 0,05                    | $\frac{-}{0,09}$    | 0,09                    | $\frac{-}{-19,7}$     | -19,7                   | $\frac{-}{-74,8}$               | -74,8                   | 0,32       | 0,72  | $v = 0,5$ |
| 1,1                | 0                   |  | 44,3  | -27,7  | 14,3  | -10,5 | 13,6                               | $\frac{42,68}{-}$     | 42,68                   | $\frac{0,42}{-}$    | 0,42                    | $\frac{0,57}{-}$    | 0,57                    | $\frac{-45,8}{-}$     | -45,8                   | $\frac{-29,7}{-}$               | -29,7                   | 0,09       | 0,04  | $w = 0,5$ |
|                    |                     | $\frac{\pi}{4}$                                  | 87,3  | -54,8  | 28,3  | -20,7 | 26,8                               | $\frac{58,5}{58,5}$   | 165,2                   | $\frac{0,61}{0}$    | 0,61                    | $\frac{0,79}{0,01}$ | 0,8                     | $\frac{-53,5}{-3,97}$ | -57,5                   | $\frac{-40}{-17,7}$             | -57,7                   | 0,08       | 0,06  |           |
|                    |                     | $\frac{\pi}{3}$                                  | 125,2 | -78,9  | 40,6  | -29,8 | 38,3                               | $\frac{57,5}{99,6}$   | 230,1                   | $\frac{0,61}{0}$    | 0,61                    | $\frac{0,8}{0}$     | 0,8                     | $\frac{-61,2}{-10,3}$ | -71,5                   | $\frac{-41,4}{-31,2}$           | -72,6                   | 0,1        | 0,07  |           |
|                    |                     | $\frac{\pi}{2}$                                  | 277,3 | -177,7 | 91,1  | -65,6 | 83,3                               | $\frac{-}{228}$       | 455,9                   | $\frac{-}{0,08}$    | 0,08                    | $\frac{-}{0,14}$    | 0,14                    | $\frac{-}{-51,1}$     | -51,1                   | $\frac{-}{-156,8}$              | -156,8                  | 0,5        | 0,93  | $v = 0,5$ |

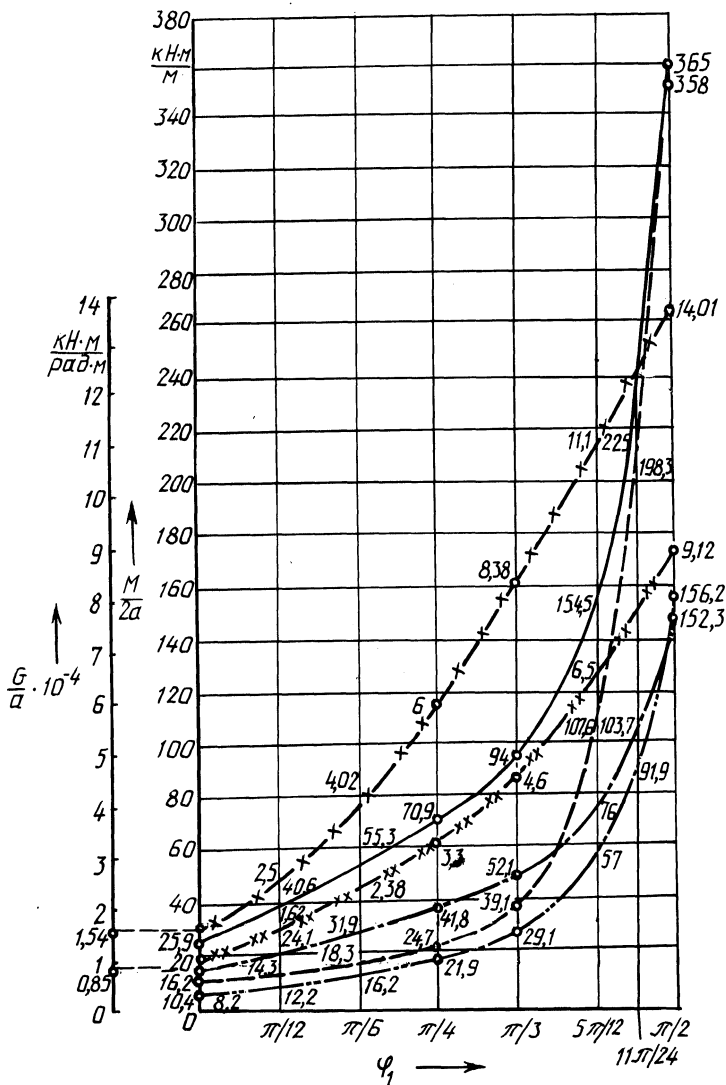


Рис. 2. Графики несущей способности оболочки-трубы и жесткости узла с продольными ребрами:  
 — несущая способность в продольном направлении при  $a/r = 3,3$ ; - - - -  
 при  $a/r = 1,1$ ; - · - · - в кольцевом направлении при  $a/r = 3,3$ ; - · - · - при  $a/r = 1,1$ ;  
 -x-x- жесткость узла при  $a/r = 3,3$ ; -xx-xx- при  $a/r = 1,1$ ; -o-o- результаты расчета оболочки

видно, что определяющей является несущая способность цилиндрической оболочки в поперечном направлении, так как  $M_2 < M_1$ . Однако в трубчатых конструкциях, оболочка которых не испытывает внутреннего давления  $p$  и  $\sigma_{02} = pr/h = 0$ , определяющей будет ее несущая способность в продольном направлении при основном напряжении  $\sigma_{01}$ , большем  $0,3...0,4\sigma_T$ .

Продольное основное напряжение следует определять по формуле  $\sigma_{01} = (N + KS) / A$ , где  $N + S$  — максимальное продольное усилие в оболочке за пределами узла;  $S$  — продольная сдвигающая сила;  $A$  — площадь кольцевого сечения оболочки;  $K$  — коэффициент концентрации напряжений.

Коэффициент  $K$  определяется согласно эпюре продольных напряжений в кольцевом сечении оболочки при действии силы  $S$ . Эту эпюру можно аппроксимировать выражением  $\sigma_{\varphi} = D(1 - F\varphi_1) / (1 + C\varphi_1) S / A$  [1], где  $D = r / [(0,605 - 0,23a/r) a]$  при  $a/r < 4/3$  и  $D = 2,5$  при  $a/r \geq 4/3$ ,  $F = 0,32$ ,  $C = 2,2(D - 1,5)$ . Отсюда  $K = 1/2 + D[1 + 2,2(D - 1,65)\varphi_1] / [1 + 4,4(D - 1,5)\varphi_1]$ .

Таким образом, в общем случае несущая способность оболочки определяется по формуле (2), а за расчетное ее значение принимается минимальное из двух значений, соответствующих расчету оболочки в продольном и кольцевом направлениях. Для длинных ребер ( $a > r$ ) можно пользоваться линейной интерполяцией значений  $a/r$  между 1,1 и 3,3, для коротких — интерполяцией между осью абсцисс и  $a/r = 1,1$  (см. рис. 2).

Толщину ребер можно учесть, допуская, что передача усилий от ребер к оболочке происходит по двум ее боковым граням в виде поперечных сил. Это равносильно замене максимальных значений  $\sigma_{i0}$  и  $\sigma_{iu}$  значениями этих же напряжений, возникающих на расстоянии половины толщины ребер.

Снижение коэффициента концентрации напряжений для продольных ребер ( $\varphi_1 = 0$ ) при  $a/r = 3,3$  и  $a/r = 1,1$  соответственно составит

$$\kappa_n = 0,768, \kappa_n = (1 - 1,5\delta'_1 / r) \text{ и } \kappa_n = 0,704, \kappa_n = (1 - 2\delta'_1 / r), \quad (3)$$

где  $\delta'_1$  — толщина ребра с учетом высоты сварных фланговых швов.

Решая совместно уравнение (3), получим поправку на толщину ребер  $\kappa_n = 1 - (2,2 - 2a)\delta'_1 / r$ .

При варьировании  $\varphi_1$  необходимо учитывать повышение несущей способности оболочки за счет толщины столика при увеличении углов обхвата трубы продольными ребрами. Тогда

$$\kappa_n = 1 - [1 - (2\varphi_1 / \pi)^2] (2,2 - 2a) \delta'_1 / r. \quad (4)$$

Представив (4) в виде  $\kappa_n = 1 - [1 - (2\varphi_1 / \pi)^2] (1 - a) \delta'_1 / (10h)$ , получим для произвольной оболочки  $\kappa_n^* = 1 - [1 - (2\varphi_1^* / \pi)^2] (1 - a) \delta'_1 / (10\pi h^*)$ , или с учетом коэффициента подобия рассматриваемой трубы (опуская звездочку)

$$\kappa_n = 1 - [1 - (2\varphi_1 / \pi)^2] (1 - a) \delta'_1 / (2\omega^{1/2}) h.$$

Для обобщения решения, представленного для оболочки-трубы  $\phi 219 \times 5$  мм как для базисной цилиндрической, воспользуемся методом подобия. Параметры произвольной оболочки в отличие от базисной будем обозначать звездочкой. Тогда, согласно [2], получим следующие коэффициенты перехода от произвольной оболочки к базисной при одних и тех же коэффициентах Пуассона:

$$\begin{aligned} \mu^* &= \mu = 0,3; \quad \varphi^* = \varphi / \pi; \quad a^* = ar^* / (\pi r); \quad M_0^* = r^* / (\pi r) \cdot (h^* / h)^2 \cdot \sigma_T^* / \sigma_T \cdot M_0; \\ G^* &= r^* / (\pi^2 r) \cdot (h^* / h)^2 \cdot E^* / E \cdot G; \quad \pi = \sqrt{r^* h / (r h^*)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Заменяя графики аппроксимируемыми полиномами, получим обобщенные расчетные выражения несущей способности узла в продольном и кольцевом направлениях, а также его жесткости, если в формулах (5) учесть значения параметров базисной оболочки:  $r = 0,11$  м;  $\omega = r/h = 22$ ;  $\sigma_T = 450$  МПа;  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа.

Опуская звездочку, для произвольной оболочки получим:

$$M_{1n} = [457 + 268a\omega^{1/2}/r - (209 - 150a\omega^{1/2})\omega^{1/2}\varphi_1 + (8 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}a\omega^{1/2}/r)\omega^4\varphi_1^8]ar^2\sigma_T/(\omega^2\kappa_n);$$

$$M_{2n} = [739 + 138a\omega^{1/2}/r + (302 + 54a\omega^{1/2}/r)\omega^{1/2}\varphi_1 + (2,9 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-5}a\omega^{1/2}/r)\omega^4\varphi_1^8]ar^2\sigma_T/(\omega^2\kappa_n);$$

$$G_n = 4540 + 600a\omega^{1/2}/r + (6950 - 136a\omega^{1/2}/r)\omega^{1/2}\varphi_1 - (1930 - 246a\omega^{1/2}/r)\omega\varphi_1^2 + (272 - 21,6a\omega^{1/2}/r)\omega^{3/2}\varphi_1^3.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М у р а ш к о Н.Н. Теоретическое исследование узлов с продольными ребрами в трубчатых стальных конструкциях // *Вопр. стр-ва и архитектуры.* — Мн., 1981. — Вып. 11. — С. 125–131. 2. С о б о л е в Ю.В., А л е ш и н Н.Н., М у р а ш к о Н.Н., П о л о в а Р.А. К расчету упругих замкнутых цилиндрических оболочек с нагрузкой в середине пролета, приложенной к продольно-радиальному ребру // *Изв. вузов. Сер. Стр-во и архитектура.* — 1974. — № 6. — С. 55–61.

УДК 692.522.2

Ю.С.МАРТЫНОВ, В.Б.СЕРГЕЕВ

#### ЖЕСТКОСТЬ МОНОЛИТНЫХ ПЛИТ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ СТАЛЬНЫМ ПРОФИЛИРОВАННЫМ НАСТИЛОМ

Экспериментальные исследования 18 фрагментов монолитных плит, различающихся геометрическими параметрами поперечного сечения, физико-механическими характеристиками материалов, при различных схемах испытаний [1] показали идентичность их деформирования. Выявлены три этапа работы конструкции, в которых совместная работа стального профилированного настила с бетоном обеспечивается ленточными связями. Различная жесткость плит на первом и втором этапах связана с образованием и раскрытием трещин в растянутом бетоне. Третий этап наступает после достижения напряжениями в нижних фибрах стального профиля предела текучести стали и развития значительных пластических деформаций в бетоне сжатой части сечения. На этом этапе наблюдается четко выраженная нелинейность деформирования образцов.