

ФОРМУЛЫ СВЯЗИ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ СЖАТО-ИЗОГНУТОГО СТЕРЖНЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Мазуренко Л.В. (Одесская государственная академия
строительства и архитектуры, г. Одесса)

Выведены формулы связи между усилиями и кривизной при действии изгибающего момента и продольной силы для всех стадий работы сечения, от упругой до разрушения. Выводы проделаны для прямоугольного сечения, однако, приведенная методика может быть использована для любого типа сечения.

Основным рабочим телом теории расчета сооружений за пределами упругости является тело Прандтля. Это вызвано приложимостью решений тела Прандтля к металлическим и железобетонным конструкциям. Значительный обзор экспериментальных работ, выполненный С.М. Крыловым [1], позволяет утверждать, что в железобетоне:

- 1) теоретическая схема разрушения подтверждается;
- 2) образование пластических шарниров сопровождается малыми деформациями.

Недопущение раскрытия трещин во втором и третьем предельных состояниях, замена арматуры внешними предельными состояниями силами, а также положение Мурашова о соответствии момента трещинообразования краевым упругим растягивающим напряжениям $2R_p$ позволяет свести решение задачи трещиностойкости конструкции к упруго-пластической задаче. Ниже рассматривается задача связи напряжений и деформаций для сжатоизогнутого стержня из идеального материала [2].

Направление вывода определяется особенностью нагрузки любого рамного стержня (для подавляющего большинства нагрузок), когда продольная сила постоянна для всех его сечений, а изменяется лишь изгибающий момент. Рассмотрение пластической работы стержня

При этом постулируются: гипотеза плоских сечений и идеальная диаграмма σ - ε Прондтля с точкой прекращения кривой. Отметим также, что напряжения от продольной силы должны быть меньше предела текучести σ_T ибо иначе момент не мог бы быть воспринят стержнем в любом сечении и равновесие «типичного» стержня было бы невозможно.,

Поэтому всегда $N < \sigma_T bh$, где b и h – соответственно ширина и высота сечения.

Стадия 1 (упругая)

$$N = \frac{bh}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1)$$

$$M = \frac{bh}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \left(\frac{h}{3} \cdot \frac{2\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} - \frac{h}{2} \right) = \frac{bh^2}{12}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

Обозначения даны в соответствии с рис. 1

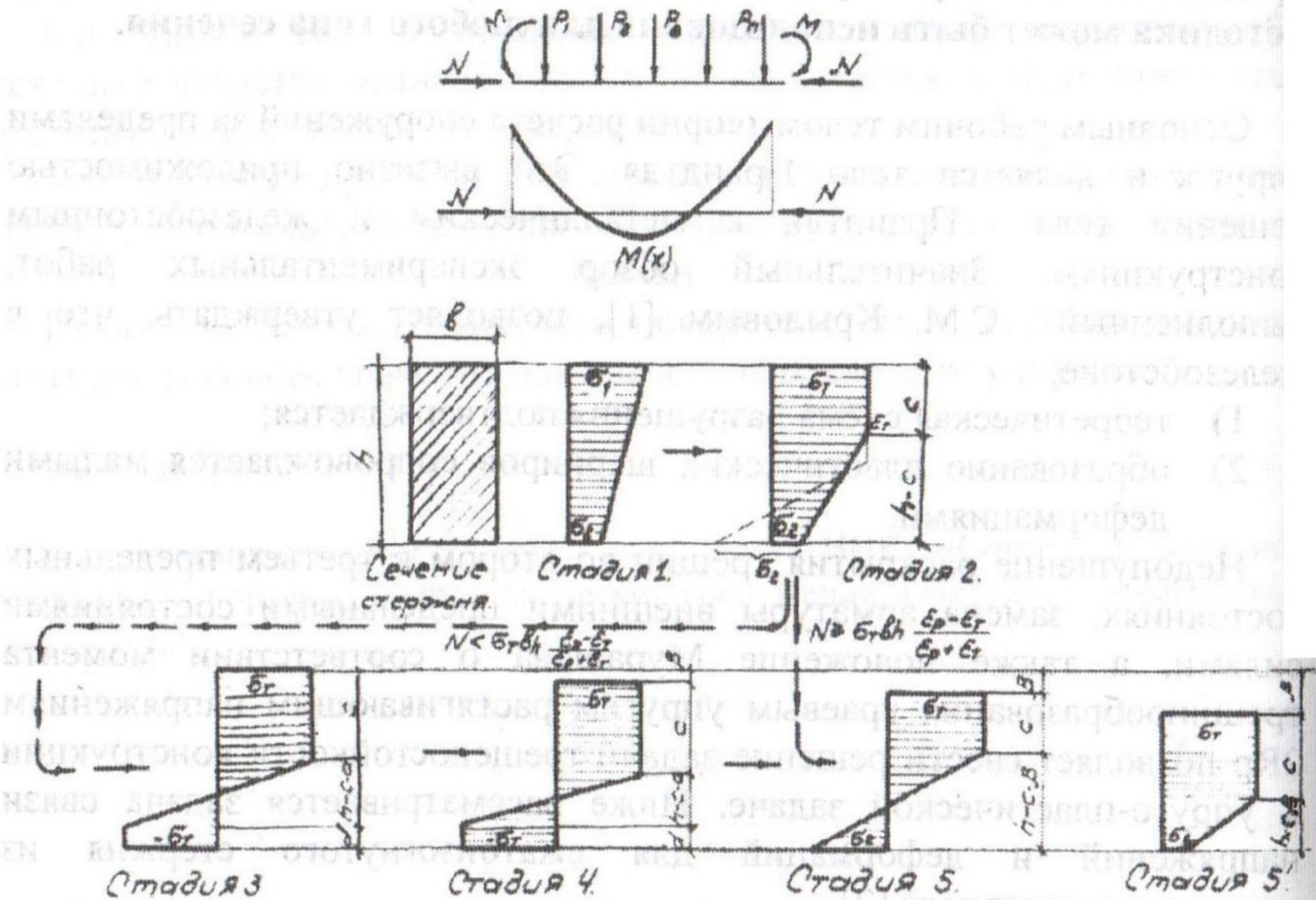


Рис. 1. Стадии статической работы сечения сжато-изогнутого стержня

Краевые деформации

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}; \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E}$$

$$\text{Кривизна } K = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{h} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{Eh} \quad (3)$$

Тогда формулу для момента можно представить в виде:

$$M = K \cdot E \cdot I,$$

$$\text{где } I = \frac{bh^3}{12} \text{ и } K = \frac{M}{EI} \quad (4)$$

Формула (4) общеизвестна и выражает тот факт, что в упругой стадии кривизна стержня зависит только от изгибающего момента и не зависит от продольной силы.

Воспользуемся общей формулой для напряжений в упругой стадии. Тогда

$$\sigma_1 = \sigma_T = \frac{N}{bh} + \frac{M}{W}; \quad \sigma_2 = \frac{N}{bh} - \frac{M}{W} \text{ и } \sigma_2 = \frac{2N}{bh} - \sigma_T \quad (5)$$

Тогда формула (2) для момента в упругой стадии запишется так:

$$M = \frac{\sigma_T - \sigma_2}{12} bh^2 = \frac{\sigma_T bh^2}{6} - \frac{Nh}{6}$$

$$\text{а из (4) } K_{[1]\max} = \frac{2\left(\sigma_T - \frac{N}{bh}\right)}{Eh} \quad (6)$$

максимальный момент упругой стадии получается подстановкой (6) в (4)

$$M_{[1]\max} = \frac{h}{6} (\sigma_T bh - N) \quad (6')$$

Стадия 2 (односторонняя текучесть).

Возникновение этой стадии определяется тем, что упругой стадии одно из краевых напряжений σ_1 больше другого по абсолютной величине, что и приводит тут к достижению σ_T (в другом краевом волокне $\sigma_1 < \sigma_T$).

$$N = \sigma_T bc + \frac{\sigma_T + \sigma_2}{2} b(h-c) = b \left[\frac{\sigma_T}{2} (h+c) + \frac{\sigma_2}{2} (h-c) \right] \quad (7)$$

$$M = \sigma_T bc \left(h - \frac{c}{2} \right) + \frac{\sigma_T + \sigma_2}{2} b(h-c) \frac{h-c}{3} \cdot \frac{2\sigma_T + \sigma_2}{\sigma_T + \sigma_2} - \left[\sigma_T bh + \frac{\sigma_T + \sigma_2}{2} b(h-c) \right] \frac{h}{2}$$

После ряда преобразований находим:

$$M = \frac{\sigma_T - \sigma_2}{12} b(h-c)(h+2c) \quad (8)$$

Кривизна

$$K = \frac{\varepsilon_T - \frac{\sigma_2}{E}}{h-c} = \frac{\sigma_T - \sigma_2}{E(h-c)} \quad (9)$$

$$c = h - \frac{\sigma_T - \sigma_2}{EK} \quad (10)$$

Из (7) и (10) выражаем σ_2 через N и K

$$N = \sigma_T b \left(h - \frac{\sigma_T - \sigma_2}{EK} \right) + \frac{\sigma_T + \sigma_2}{2} \cdot \frac{\sigma_T - \sigma_2}{EK} b$$

Имеем квадратное уравнение относительно σ_2 .

Решением его является

$$\sigma_2 = \sigma_T \pm \sqrt{2EK \left(\sigma_T h - \frac{N}{b} \right)}$$

Знак $+$ невозможен, ибо в противном случае $\sigma_2 > \sigma_T$, поэтому окончательно

$$\sigma_2 = \sigma_T - \sqrt{2EK \left(\sigma_T h - \frac{N}{b} \right)} \quad (11)$$

Подставляя (10) в (8), находим

$$M = \frac{b}{12} \cdot \frac{(\sigma_T - \sigma_2)^2}{EK} \left(3h - 2 \frac{\sigma_T - \sigma_2}{EK} \right) \quad (12)$$

Отсюда с использованием (11)

$$M = (\sigma_T - bh - N) \left[\frac{h}{2} - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2(\sigma_T bh - N)}{Ebh}} \right] \quad (12)$$

Это основная формула связи для односторонней текучести.

При $N = \text{const}$ определим кривизну и момент, соответствующие началу и концу односторонней текучести ($\sigma_1 = \sigma_T$).

Низшая кривизна односторонней текучести соответствует $c=0$ и из (10)

$$K_{[2]_{\text{мин}}} = \frac{\sigma_T - \sigma_2}{Eh} = \frac{2\left(\sigma_T - \frac{N}{bh}\right)}{Eh} \quad (13)$$

Изгибающий момент, соответствующий этой кривизне, находится подстановкой (13) в (12) и равен

$$M_{[2].\text{мин}} = \frac{h}{6}(\sigma_T bh - N) \quad (13')$$

Максимальная кривизна стержня на стадии односторонней текучести определяется условием $\sigma_2 = \sigma_T$ и из (11) получаем:

$$\sqrt{2EK\left(\sigma_T h - \frac{N}{b}\right)} = 2\sigma_T$$

$$K_{[2].\text{макс}} = \frac{2\sigma_T^2}{E\left(\sigma_T h - \frac{N}{b}\right)} \quad (14)$$

Изгибающий момент, соответствующий этой кривизне, находится подстановкой (14) в (12)

$$M_{[2].\text{макс}} = \frac{1}{6}(\sigma_T bh - N)\left(h + \frac{2 \cdot N}{\sigma_T b}\right) \quad (14')$$

Из принципа непрерывности деформаций и усилий в сечениях стержня вытекает, что максимальные кривизна и момент упругой стадии должны совпадать с минимальными кривизной и моментом стадии односторонней текучести. Сравнение (6) и (6') с (13) и (13') убеждает в справедливости выше изложенного.

Следует отметить, что формулы (7-12) справедливы и в случае $\sigma_2 < 0$ (рис. 1).

Стадия 3 (двусторонняя текучесть).

$$N = \sigma_T b(c - d) \quad (15)$$

$$M = \sigma_T bc\left(h - \frac{c}{2}\right) + \frac{\sigma_T(h - c - d)b}{4}\left(\frac{h - c - d}{3} + \frac{h - c - d}{2} + d\right) -$$

$$- \frac{\sigma_T(h - c - d)b}{4}\left(\frac{h - c - d}{6} + d\right) - \sigma_T b \frac{d^2}{2} - \sigma_T b(c - d) \frac{h}{2}$$

После приведения подобных получим

$$M = \frac{\sigma_T b}{6}(hc + hd + h^2 - 2c^2 - 2d^2 + 2cd) \quad (16)$$

Кривизна определяется высотой упругого ядра:

$$K = \frac{2\sigma_T}{E(h - c - d)} \quad (17)$$

$$\text{Из (17) } c = h - d - \frac{2\sigma_T}{EK} \quad (18)$$

Зависимости (15) и (18) позволяют определить «d»:

$$d = \frac{h}{2} - \frac{\sigma_T}{EK} - \frac{N}{2\sigma_T b} \quad (19)$$

$$\text{Отсюда } c = \frac{h}{2} - \frac{\sigma_T}{EK} + \frac{N}{2\sigma_T b} \quad (20)$$

Подставляя (19) и (20) в (15), находим:

$$M = \frac{\sigma_T b}{6} \left[\frac{3}{2} h^2 - \frac{2\sigma_T^2}{E^2 K^2} - \frac{3}{2} \frac{N^2}{\sigma_T^2 b^2} \right]$$

$$\text{или } M = \frac{\sigma_T b h^2}{4} - \frac{N^2}{4\sigma_T b} - \frac{\sigma_T^3 b}{3E^2 K^2} \quad (21)$$

Последняя формула является основной формулой для стадии двусторонней текучести

$$\text{Из (21) } K = \sqrt{\frac{\sigma_T^3 b}{3E^2 \left(\frac{\sigma_T b h^2}{4} - \frac{N^2}{4\sigma_T b} - M \right)}} \quad (22)$$

Если принять классическую гипотезу о бесконечности деформаций, то в предельном состоянии $k = \infty$, что возможно лишь, если знаменатель под корнем выражения (22) равен нулю.

$$\text{Отсюда } M = \frac{\sigma_T b h^2}{4} - \frac{N^2}{4\sigma_T b} \quad (23)$$

То есть, получаем известную из литературы зависимость.

Если продифференцировать (21) по «K», то получим:

$$\frac{dM}{dK} = \frac{2\sigma_T^3 b}{3E^2 K^3} > 0$$

Это значит, что на стадии двусторонней текучести момент возрастает с ростом кривизны.

Минимальная кривизна стержня на стадии двусторонней текучести определяется условием $d=0$ и из (19) имеем:

$$K_{[3].\min} = \frac{2\sigma_T^2}{E(\sigma_T h - \frac{N}{6})} \quad (24)$$

Минимальный изгибающий момент этой стадии определяется из (21) и (24)

$$M_{[3].\min} = \frac{1}{6}(\sigma_T b h - N)(h + \frac{2N}{\sigma_T b}) \quad (24')$$

Сравнение (24) и (24') с (14) и (14') показывает, что минимальные кривизна и момент при двусторонней текучести совпадают с максимальными кривизной и моментом односторонней текучести.

Найдем максимальную кривизну стержня на стадии двусторонней текучести. Она определяется из условия, что максимальное краевое относительное удлинение достигает критической для данного материала величины ε_p .

Используя (17), имеем

$$\varepsilon_{\text{краевые}} = \frac{2\sigma_T}{E(h-c-d)} \left(\frac{h-c-d}{2} + c \right) = \varepsilon_p \quad (25)$$

Из (19) и (20) ясно, что $c > d$

Подставляя (19) и (20) в (25) и выражая K , получим:

$$K_{[3].\max} = \frac{2\varepsilon_p}{h(1 + \frac{N}{\sigma_T b h})} \quad (26)$$

Максимальный изгибающий момент определяется из (26) и (21)

$$M_{[3].\max} = \frac{\sigma_T b h^2}{4} - \frac{N^2}{4\sigma_T b} - \frac{\varepsilon_p^2 (\sigma_T b h + N)^2}{12\varepsilon_p^2 \sigma_T b} \quad (26')$$

Как показано на рис. 1, стадия односторонней текучести может переходить в стадию двусторонней текучести. Интересно, при каких значениях продольной силы, и при каких свойствах материала, это возможно.

Аналитически это условие выражается так:

$$K_{[3].\max} \leq K_{[3].\min}$$

$$\frac{2\varepsilon_p}{h(1 + \frac{N}{\sigma_T bh})} \leq \frac{2\sigma_T}{E(1 - \frac{N}{\sigma_T bh})}$$

или $\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_p} \leq \frac{\sigma_T bh - N}{\sigma_T bh + N}$

Отсюда $N \geq \sigma_T bh \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_T}{\varepsilon_p + \varepsilon_T}$ (27)

Итак, при значениях N , определяемых формулой (27), двусторонняя текучесть не возникает и односторонняя текучесть сразу же переходит в одностороннее разрушение.

Стадия 4 (одностороннее разрушение при двусторонней текучести)

$$N = \sigma_T b(c - d) \quad (28)$$

$$M = \sigma_T b c \left(h - \frac{c}{2} - \beta \right) + \frac{\sigma_T b}{6} (h - c - d - \beta)^2 - \sigma_T \frac{bd^2}{2} - \sigma_T b \frac{d^2}{2} - \sigma_T b (c - d) \frac{h}{2} = \frac{\sigma_T b}{6} [h^2 - 2(c^2 + d^2) + h(c + d) + 2cd + \beta(2d - 4c - 2h) + \beta^2] \quad (29)$$

Выразим β через «с» и «d».

Деформации волокна, начавшего разрушиться:

$$\varepsilon_p = K \left(c + \frac{h - c - d - \beta}{2} \right),$$

откуда $\beta = h + c - d - \frac{2\varepsilon_p}{K}$ (30)

С другой стороны

$$K = \frac{2\sigma_T}{E(h - c - d - \beta)},$$

а с использованием (30) получим

$$K = \frac{\sigma_T}{E\left(\frac{\varepsilon_p}{K} - c\right)},$$

$$\text{откуда } c = \frac{\varepsilon_p}{K} - \frac{\sigma_T}{EK} \quad (31)$$

Подставляя (31) в (28), найдем d:

$$d = \frac{\varepsilon_p}{K} - \frac{\sigma_T}{EK} - \frac{N}{\sigma_T b} \quad (32)$$

Тогда выражая β , d и c в (28) через (30), (31) и (32), получим формулу для M:

$$M = \frac{\varepsilon_p^2 \sigma_T b}{K^2} - \frac{N^2}{2\sigma_T b} - \frac{Nh}{2} - \frac{\sigma_T^3 b}{3E^2 K^2} \quad (33)$$

$$\text{Отсюда } \frac{dM}{dK} = -\frac{2\sigma_T b}{K^3} \left(\varepsilon_p^2 - \frac{\sigma_T^2}{3E^2} \right) < 0 \text{ при любом } N \text{ и на}$$

данной стадии момент убывает с ростом кривизны. Значит экстремальные значения изгибающих моментов расположены на границах участка.

Минимальное значение кривизны для данной стадии отвечает условию $\beta=0$

$$h + c - d - \frac{2\varepsilon_p}{K} = 0$$

Но из (31) и (32)

$$c - d = \frac{N}{\sigma_T b} \quad K_{[4]_{\min}} = \frac{2\varepsilon_p \sigma_T b}{\sigma_T b h + N} \quad (34)$$

Минимальное значение изгибающего момента этой стадии получается подстановкой (34) в (33)

$$M_{[4]_{\min}} = \frac{\sigma_T b h^2}{4} - \frac{N^2}{4\sigma_T b} - \frac{\varepsilon_p^2 (\sigma_T b h + N)^2}{12\varepsilon_p^2 \sigma_T b} \quad (34')$$

Сравнение (34) и (34') с (26) и (26') показывает, что минимальные кривизна и момент данной стадии совпадают с максимальными кривизной и моментом стадии двусторонней текучести.

Какой же будет последующая стадия?

Главный вопрос состоит в том, достигается ли разрушение и в другой зоне.

Проследим изменение краевой деформации ε_u

$$\varepsilon_u = K \left(\frac{h - c - d - \beta}{2} + d \right) \quad (35)$$

$$\text{Из (31) и (32) следует, что } c - d = \frac{N}{\sigma_T b} \quad (36)$$

$$\text{Из (30) получим } \beta = h + \frac{N}{\sigma_T b} - \frac{2\varepsilon_p}{K} \quad (37)$$

Подставляя (36) и (37) в (35), находим:

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{кр} - \frac{NK}{\sigma_T b} \quad (38)$$

Из (38) следует, что с увеличением кривизны на четвертой стадии краевая деформация неразрушающейся зоны убывает. Верхней

границей стадии служит условие $\varepsilon_u = \frac{\sigma_T}{E}$, подстановка которого в

(38) позволяет определить максимальную кривизну этой стадии.

$$K_{[4].\text{макс}} = \frac{\sigma_T b}{N} (\varepsilon_{кр} - \varepsilon_T) \quad (39)$$

Изгибающий момент, соответствующий этой кривизне

$$M_{[4].\text{макс}} = -\frac{N}{2} \left(\frac{N}{\sigma_T b} + h \right) + \frac{N^2}{\sigma_T b} \cdot \frac{\varepsilon_p^2 - \frac{\varepsilon_T^2}{3}}{(\varepsilon_p - \varepsilon_T)^2} \quad (39')$$

Стадия 4 оказывается осуществимой, если $K_{[4].\text{мин}} < K_{[4].\text{макс}}$, что

приводит к условию $N < \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_T}{\varepsilon_p + \varepsilon_T} \sigma_T b h$, полностью аналогичному

условию (27).

Итак, очевидно, что следующая стадия работы сечения происходит при разрушении материала в одной зоне (сжатия или растяжения) и упругой работе его в другой зоне.

Следует отметить, что эта стадия возникает всегда:

а) при $N < \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_T}{\varepsilon_p + \varepsilon_T} \sigma_T b h$ она возникает после 3 и 4 стадий (рис. 1)

б) при $N \geq \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_T}{\varepsilon_p + \varepsilon_T} \sigma_T b h$ сразу после стадии 2 (рис. 1).

Стадия 5 (разрушение материала в одной из зон при упругой работе материала в другой зоне)

$$N = \sigma_T b c + \frac{\sigma_T - \sigma_2}{2} (h - c - \beta) b \quad (40)$$

$$M = \sigma_T b c \left(h - \frac{c}{2} - \beta \right) + \frac{\sigma_T^2 b}{2(\sigma_T + \sigma_2)} (h - c - \beta) \times$$

$$\times \left[\frac{2}{3} \frac{\sigma_T}{\sigma_T + \sigma_2} (h - c - \beta) + \frac{\sigma_2}{\sigma_T + \sigma_2} (h - c - \beta) \right] - \quad (41)$$

$$- \frac{\sigma_2^3 b}{6(\sigma_T + \sigma_2)^2} (h - c - \beta)^2 - N \frac{h}{2}$$

Кривизна $K = \frac{\sigma_T + \sigma_2}{E(h - c - \beta)}$, отсюда

$$\beta = h - c - \frac{\sigma_T + \sigma_2}{KE} \quad (42)$$

Условие возникновения краевой разрушающей деформации

$$\varepsilon_p = K \left[\frac{\sigma_T}{\sigma_T + \sigma_2} (h - c - \beta) + c \right]$$

вместе с (42) позволяет определить «с»:

$$c = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_T}{K} \quad (43)$$

$$\text{Из (42) } \beta = h - \frac{\varepsilon_p}{K} - \frac{\sigma_2}{KE} \quad (44)$$

$$\text{Тогда } N = \frac{\sigma_T b}{K} (\varepsilon_p - \varepsilon_T) + \frac{\sigma_T^2 b}{2EK} - \frac{\sigma_2^2 b}{2EK},$$

$$\text{откуда } \sigma_2 = \sqrt{2\sigma_T E \varepsilon_p - \sigma_T^2 - \frac{2NEK}{b}} \quad (45)$$

Знак минус перед корнем отбрасываем, ибо в выводе σ_2 принято положительным.

Подставляя (45) в (41), находим основное уравнение данной стадии в виде:

$$M = \frac{\sigma_T b}{6K^2 E^2} \left[3E^2 \varepsilon_p^2 - \sigma_T^2 + \left(4E\varepsilon_p - 2\sigma_T + \frac{2NKE}{\sigma_T b} \right) \sqrt{2\sigma_T E\varepsilon_p - \sigma_T^2 - \frac{2NEK}{b}} \right] \quad (46)$$

Минимальная кривизна стадии 5 соответствует условию $\sigma_2 = \sigma_T$, что дает

$$K_{[5].\min} = \frac{\sigma_T b}{N} (\varepsilon_p - \varepsilon_T) \quad (47)$$

Изгибающий момент, соответствующий этой кривизне

$$M_{[5].\max} = \frac{N}{2} \left(\frac{N}{\sigma_T b} + h \right) + \frac{N^2}{\sigma_T b} \frac{\varepsilon_p^2 - \frac{\varepsilon_T^2}{3}}{(\varepsilon_p - \varepsilon_T)^2} \quad (47')$$

Зависимости (47) и (47') тождественно равны зависимостям (39) и (39') и стадии 4 и 5 непрерывно переходят друг в друга.

Дифференцирование (46) по K показывает, что

$$\frac{dM}{dK} < 0$$

Если же имеет место непосредственный переход от стадии односторонней текучести к стадии одностороннего разрушения с упругой работой в другой зоне, то и тут максимальная кривизна стадии 2 совпадает с минимальной кривизной стадии 5.

Действительно, для односторонней текучести $\varepsilon_p = Kh + \frac{\sigma_2}{E}$, а с использованием (11) получим для определения $K_{[2].\max}$ квадратное уравнение

$$K^2 - 2K \left(\frac{\varepsilon_p}{h} - \frac{N}{Ebh^2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_T}{h} \right)^2 = 0 \quad (48)$$

В стадии одностороннего разрушения условием $K_{[5].\min}$ является $\beta=0$ и из (44) и (45) получим для нахождения $K_{[5].\min}$ точно такое же уравнение, как (48).

Значит $K_{[2].\max} = K_{[5].\min}$

Как видно из (45) с ростом кривизны σ_2 убывает.

Границей стадии служит $\sigma_2=0$ и из (45) получаем, что

$$K_{[5]_{\max}} = \frac{\sigma_T b}{N} \left(\varepsilon_p - \frac{\varepsilon_T}{2} \right) \quad (49)$$

В дальнейшем σ_2 проходит через ноль и возрастает.

Эпюра напряжений принимает вид (см. рис. 1, стадию 5).

$$N = \sigma_T b c + \frac{\sigma_T + \sigma_2}{2} b (h - c - \beta) \quad (50)$$

$$M = \sigma_T b c \left(h - \frac{c}{2} - \beta \right) + \frac{2\sigma_T + \sigma_2}{6} b (h - c - \beta)^2 \quad (51)$$

$$K = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_T}{c}, \quad c = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_T}{K}$$

Отсюда

$$\beta = h - \frac{\varepsilon_p}{K} + \frac{\sigma_2}{EK} \quad (52)$$

Подставляя (51) и (52) в (50) и решая полученное выражение относительно σ_2 , получим (45) и с ростом «К» величина σ_2 опять будет убывать по абсолютной величине до значения $\sigma_2=0$, т.е. постулированный проход σ_2 через ноль и возрастание его по абсолютной величине с другим знаком невозможны и $\sigma_2=0$. В дальнейшем

$$K = \frac{\sigma_T b}{N} \left(\varepsilon_p - \frac{\varepsilon_T}{2} \right); \quad M = \frac{N^2}{2\sigma_T b} \frac{\varepsilon_p^2 - \frac{\varepsilon_T^2}{3}}{\left(\varepsilon_p - \frac{\varepsilon_T}{2} \right)^2} - \frac{N}{2}$$

Вывод.

Для сжато-изогнутого стержня прямоугольного сечения даны формулы связи напряжений и деформации для всех стадий работы.

Литература

1. Крылов С.М. Перераспределение усилий в статически неопределимых железобетонных конструкциях. Издательство литературы по строительству. Москва. 1964.
2. Черноморниипроект. Отчет по теме «Совершенствование конструкций портовых гидротехнических сооружений и методов их расчета». Одесса, 1969.