

*к.т.н., доц. Беляева С.Ю.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ,  
АРМИРОВАННЫХ СТАЛЬНЫМ ПРОФИЛИРОВАННЫМ  
НАСТИЛОМ, НА ОСНОВЕ РЕАЛЬНЫХ ДИАГРАММ  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

*Наведено методикку розрахунку міцності і деформативності нормальних перерізів елементів, що згинаються, армованих СПН, з використанням повної діаграми деформування бетону й пружно-пластичної діаграми Прандтля в сталевому профнастилі.*

Результаты экспериментальных исследований, приведенные в [1], а также исследования [2, 3 и др.] показали, что разрушение нормальных сечений железобетонных плит, армированных стальным профнастилом (СПН) может происходить при достижении предела текучести в части или по всей высоте сечения профнастила либо при упругой его работе в зависимости от высоты сжатого бетона и завершается разрушением бетона сжатой зоны. Таким образом, в процессе деформирования плит СПН и сжатый бетон могут проявлять упругопластические свойства вплоть до разрушения. В связи с этим разработана методика расчета, которая основана на замене реальной диаграммы " $\sigma - \varepsilon$ " условной диаграммой Прандтля и учитывает развитие пластических деформаций в бетоне и стали [4]. Наряду с преимуществами в сравнении с методикой на основе прямоугольной эпюры распределения напряжений в стальном профилированном настиле и бетоне сжатой зоны [5], методика [4] вносит определенные погрешности в оценку прочности и жесткости железобетонного элемента, армированного СПН. С целью устранения погрешностей, вносимых трапециидальной эпюрой распределения напряжений в бетоне, и необходимостью точного определения значения жесткостей на всех этапах нагружения разработана методика расчета железобетонных элементов, армированных стальным профнастилом, с использованием реальной, криволинейной диаграммы деформирования бетона и диаграммы Прандтля для стального профнастила [6,7]. Из существующих предложений [8-11] для описания диаграммы сжатия бетона как наиболее удобный с точки зрения интегрирования уравнений

равновесия расчетного сечения в данной методике принят полином пя-

той степени  $\sigma_b = R_b \sum_{r=1}^5 a_k \left( \frac{\varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{bR}} \right)^k$  (предложение НИИСК) [12, 13].

Для элемента таврового сечения, армированного СПН, условия равенства нулю суммы проекций всех сил на продольную ось и суммы изгибающих моментов относительно нейтральной оси записываются в зависимости от положения нейтральной оси в полке или ребре расчетного таврового сечения. Расчетные предпосылки и разработанные формулы для двух расчетных случаев приведены в [6, 7].

Ниже приведен общий порядок расчета прочности нормальных к продольной оси элемента сечений для железобетонных конструкций, армированных стальным профилированным настилом.

Расчетные зависимости в развернутом виде для оценки напряженно-деформированного состояния расчетного сечения рассмотрим для случая расположения нейтральной оси в пределах толщины «полки» плиты  $x \leq h_f$  при упругопластической работе СПН (рисунок 1).

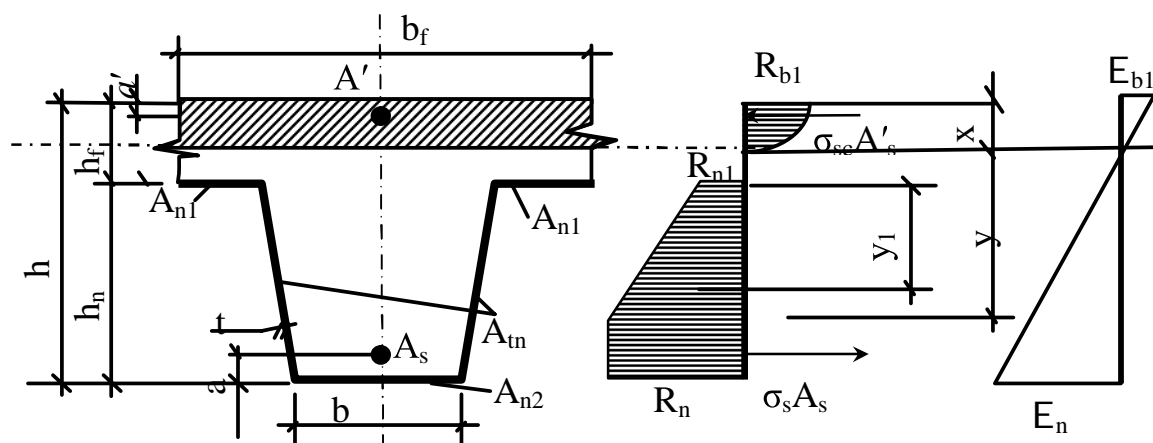


Рисунок 1 – Напряженно-деформированное состояние сечения при  $x \leq h_f$

Усилия в элементе определяются по следующим формулам:

$$F(\chi, \varepsilon_{b1}) = \frac{R_b \cdot b_f \cdot x \cdot \varepsilon_{bR}}{\varepsilon_1} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{bR}} \right)^{k+1} + \sum \sigma_{si} A_{si} + \sum R_{ni} A_{ni}; \quad (1)$$

$$M(\chi, \varepsilon_{b1}) = \frac{R_b \cdot b_f \cdot x^2 \cdot \varepsilon_{bR}^2}{\varepsilon_1^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{bR}} \right)^{k+2} + \sum \sigma_{si} A_{si} z_{si} + \sum R_{ni} A_{ni} z_{ni}, \quad (2)$$

где  $R_b$  - призмная прочность бетона;

$a_k$  - коэффициенты полинома, принимаемые по таблицам [13];

$\varepsilon_{b1}$  - деформации крайнего сжатого волокна сечения;

$\varepsilon_{bR}$  - относительные деформации сжатия бетона, соответствующие напряжениям  $\sigma_b = R_b$ ;

$x$  - высота сжатой зоны расчетного сечения;

$\sum \sigma_{si} A_{si}$  и  $\sum \sigma_{si} A_{si} z_{si}$  - суммы усилий в стержневой арматуре (при ее наличии):

$$\sum \sigma_{si} A_{si} = -\sigma_s A_s + \sigma_{sc} A'_s; \quad (3)$$

$$\sum \sigma_{si} A_{si} z_{si} = \sigma_{sc} A'_s (x - a') - \sigma_s A_s (h - a - x), \quad (4)$$

- деформации и напряжения в стержневой арматуре:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{b1}(h - x - a)}{x} \leq \varepsilon_{su}; \quad \varepsilon_{sc} = \varepsilon_{b1} \left(1 - \frac{a'}{x}\right) \leq \varepsilon_{scu}.$$

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq R_s; \quad \sigma_{sc} = E_s \varepsilon_{sc} \leq R_{sc}; \quad (5)$$

$\sum R_{ni} A_{ni}$  и  $\sum R_{ni} A_{ni} z_{ni}$  - суммы сил и моментов в стальном профилированном настиле соответственно:

$$\sum R_{ni} A_{ni} = -t_n [R_{vp} \cdot (b_f - b) + R_{np} \cdot b + 2 \cdot R_{stel} (x + y - h_f) + 2 \cdot R_{stpl} \cdot (h - x - y)]; \quad (6)$$

$$\sum R_{ni} A_{ni} z_{ni} = t_n [R_{vp} \cdot (b_f - b) \cdot (h_f - x) + R_{np} \cdot b \cdot (h - x) + 2 \cdot R_{stel} (x + y - h_f) \cdot (h_f - x + y_1) + R_{stpl} \cdot (h - x - y) \cdot (h - x + y)]. \quad (7)$$

При нахождении  $\sum R_{ni} A_{ni}$  и  $\sum R_{ni} A_{ni} z_{ni}$  :

- деформации и напряжения в верхней полке СПН:

$$\varepsilon_{vp} = \frac{\varepsilon_{b1} \cdot (h_f - x)}{x} \leq \varepsilon_{nu}, \quad (8)$$

$$R_{vp} = E_n \cdot \varepsilon_{vp} \leq R_n; \quad (9)$$

- деформации и напряжения в нижней полке СПН:

$$\varepsilon_{np} = \frac{\varepsilon_{b1} \cdot (h - x)}{x} \leq \varepsilon_{nu}, \quad (10)$$

$$R_{np} = E_n \cdot \varepsilon_{np} \leq R_n; \quad (11)$$

-  $\varepsilon_{su} = \varepsilon_{nu} = 200 \cdot 10^{-5}$  - предельные деформации растяжения стержневой арматуры и стали СПН;

$y_1$  - расстояние от верхней полки стального профилированного настила до центра тяжести эпюры напряжений в стенке, работающей в упругой стадии:

$$y_1 = \frac{(x + y - hf) \cdot (R_{vp} + 2 \cdot R_n)}{3 \cdot (R_{vp} + R_n)}; \quad (12)$$

$y$  - расстояние от нейтральной оси до точки перелома эпюры напряжений в стальном профилированном настиле:

$$y = \frac{R_n \cdot x}{E_n \cdot \varepsilon_{b1}}. \quad (13)$$

Уравнения равновесия сечения представляют собой систему нелинейных алгебраических уравнений с двумя неизвестными: деформацией крайнего сжатого волокна  $\varepsilon_{b1}$ , высотой сжатой зоны  $x$ , которая решается подбором и справедлива до тех пор, пока выполняются условия:

$$\varepsilon_{b1} \leq \varepsilon_{bu}; \quad \varepsilon_{ni} \leq \varepsilon_{nu}; \quad \varepsilon_{si} \leq \varepsilon_{su}. \quad (14)$$

Несоблюдение хотя бы одного из этих неравенств определяет разрушение сечения.

При оценке напряженно-деформированного состояния сечения задача может решаться в двух постановках:

1) при заданных усилиях определить кривизну  $\chi$  в сечении и деформации  $\varepsilon$ ;

2) при заданной величине кривизны  $\chi$  в сечении определить величину изгибающего момента  $M$ .

Первая задача решается в следующей последовательности:

1) задаемся некоторым начальным значением кривизны:  $\chi = \chi_0$ ;

2) задаемся начальным значением деформации крайнего сжатого волокна бетона  $\varepsilon_{b1} = \varepsilon_0$  и находим  $\overline{\varepsilon_{b1}} = \varepsilon_0 / \varepsilon_{bR}$ ;

3) вычисляем высоту сжатой зоны:

$$x = \frac{\varepsilon_{b1}}{\chi}, \quad (15)$$

и, в зависимости от положения нейтральной оси, устанавливаем случай расчета;

4) определяем расстояние от нейтральной оси до точки перелома эпюры напряжений в стальном профилированном настиле  $y$ , формула (13);

5) в стальном профилированном настиле деформации и напряжения, а также сумму усилий  $\sum R_{ni} A_{ni}$  определяем в зависимости от расчетного случая, например, при  $x \leq h_f$  - по формулам (6, 8-12);

В случаях, когда напряжения в отдельных элементах СПН, вычисленные по указанным формулам, превышают предел текучести  $\sigma_{spni} \geq R_n$  принимаем  $\sigma_{spni} = R_n$ .

Необходимо учитывать, что формулы (6, 8-12) справедливы только при упругопластической работе настила (рисунок 1). При упругой работе настила, когда  $(y + x) > h$ , а также когда напряжения во всех частях стального профилированного настила достигают предела текучести  $R_{vp} = R_{np} = R_{st\ el} = R_{st\ pl} = R_n$  формулы определения суммы усилий в СПН имеют другой вид;

б) в стержневой арматуре (при ее наличии) определяем:

- напряжения - по формулам (5):

при  $\sigma_{sc} \geq R_{sc}$  принимать  $\sigma_{sc} = R_{sc}$ ; при  $\sigma_s \geq R_s$  принимать  $\sigma_s = R_s$ ;

- сумму проекций сил  $\sum \sigma_{si} A_{si}$  по формуле (3);

7) вычисляем значение функции  $F(\chi, \varepsilon_{b1})$  в зависимости от случая расчета (при  $x \leq h_f$  - по формуле (1)) и проверяем условие равенства нуля проекций всех сил на горизонтальную ось элемента:

$$F(\chi, \varepsilon_{b1}) = 0. \quad (16)$$

Если условие не выполняется, принимаем новое значение:  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_0$  (при этом  $\Delta\varepsilon_0 > 0$ , если  $F(\chi, \varepsilon_{b1}) < 0$  и наоборот). Расчет повторяем по пп. 3 – 7 до тех пор, пока условие (16) с заданной точностью не удовлетворяется;

8) вычисляем значение суммы моментов в стальном профнастиле  $\sum R_{ni} A_{ni} z_{ni}$  в зависимости от расчетного случая, для  $x \leq h_f$  - по формуле (7);

9) вычисляем значение суммы моментов  $\sum \sigma_{si} A_{si} z_{si}$  в стержневой арматуре (при ее наличии) по формуле (4);

10) в зависимости от формы равновесия (расчетного случая) вычисляем значение функции  $M(\chi, \varepsilon_{b1})$ , для случая при  $x \leq h_f$  - по формуле (2);

11) Проверяем условие:

$$M(\chi, \varepsilon_{b1}) - M = 0, \quad (17)$$

где  $\chi = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_1}{x}$  - кривизна изогнутой оси в сечении;

$M$  - внешний изгибающий момент.

Если условие не выполняется, принимаем новое значение  $\chi = \chi + \Delta\chi$ ; при этом  $\Delta\chi > 0$ , если  $M(\chi, \varepsilon_{b1}) < M$ , повторяем расчет по пп. 2...11 до тех пор, пока условие (17) с заданной точностью не удовлетворяется.

При решении второй из указанных задач расчет производится по пп. 2...10, после чего искомая величина изгибающего момента определяется из условия:

$$M(\chi, \varepsilon_{b1}) = M. \quad (18)$$

Прочность и жесткость сечения считается исчерпанной, если деформации бетона или арматуры достигают своих предельных значений:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{bu} \text{ или } \varepsilon_n = \varepsilon_{nu}, \quad \varepsilon_s = \varepsilon_{su}.$$

Проверка прочности сечения производится из условия:

$$M \leq M_u(\chi, \varepsilon_0), \quad (19)$$

где  $M_u(\chi, \varepsilon_0)$  - предельное (при исчерпании прочности), значение функции  $M(\chi, \varepsilon_0)$ .

Величина  $M_u(\chi, \varepsilon_0)$  устанавливается в соответствии с пп. 2...10 приведенной последовательности расчета при:

$$\chi = \frac{\varepsilon_{bu}}{x}, \quad (20)$$

где  $\varepsilon_{bu}$  - предельные относительные деформации сжатия бетона.

При определении суммарных перемещений от внешней нагрузки жесткость сечения на изгиб принимается равной:

$$B_M = \frac{M}{\chi}. \quad (21)$$

После определения всех приведенных выше параметров напряженно-деформированного состояния сечения можно определить напря-

жения в любом по высоте сечения волокне бетона и в арматуре, а также кривизну изогнутой оси элемента в рассматриваемом сечении. Уравнения равновесия могут быть использованы для построения зависимости «момент- кривизна», т.е. установления связи между фибровой деформацией сжатого бетона, задаваемой с определенным шагом, кривизной и действующими в сечении усилиями.

Предложенные зависимости для оценки напряженно-деформированного состояния сечения изгибаемого железобетонного элемента, армированного СПН, таврового профиля отражают степень его деформирования на всех этапах работы, вплоть до исчерпания несущей способности. Приведенная методика на основе реальных диаграмм деформирования материалов позволяет четко сформулировать критерии исчерпания несущей способности плит, армированных СПН, проектировать статически определимые и неопределимые конструкции по стальному профнастилу с минимальным расходом материалов, рассчитывать теоретические прогибы с учетом точного значения жесткостей на всех этапах работы элемента. Результаты сопоставления разработанной и действующей [5] расчетных методик с экспериментом показали, что для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции в стадии эксплуатации наиболее достоверной представляется методика с использованием параметров полной диаграммы сжатия бетона и диаграммы Прандтля для стального профнастила.

*Приведена методика расчета прочности и деформативности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных СПН, с использованием полной диаграммы деформирования бетона и упруго-пластической диаграммы Прандтля в стальном профнастиле.*

*Design procedures for strength and deformation properties of standard cross-sections of the bent reinforced concrete elements additionally reinforced with the SSF on the basis of full diagram of deformation of concrete and Prandtl's elasto-plastic diagram in steel shaped flooring have been developed.*

#### **Библиографический список.**

1. Беляева С.Ю. Экспериментальные исследования железобетонных плит, армированных стальным профилированным настилом // Зб. наук. праць Донбас. технічн. ун-ту. – Вып. 20. – Алчевск: «Лад» ДГМІ. – 2005. – С. 344–348.

2. Монолитные перекрытия зданий и сооружений / Санников И.В., Величко В.А., Соломонов С.В., Бимбад Г.Е., Томильцев М.Г. – К.: Будивэльныйк, 1991. – 152 с.: ил.

3. Сергеев В.Б. Сталезелезобетонные перекрытия с использованием стального профилированного настила: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Белорус. политехн. ин-т. – Минск, 1986. – 20 с.

4. Давиденко А.И., Беляева С.Ю. Расчет железобетонной конструкции перекрытия, армированной стальным профилированным настилом, на основе упругопластической диаграммы работы материалов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ, ПДАБтаА - 2003. - №8. – С.10-15.

5. Рекомендации по проектированию монолитных железобетонных перекрытий со стальным профилированным настилом / НИИЖБ, ЦНИИПромизданий. – М.: Стройиздат, 1987. – 40 с.

6. Давиденко А.И., Давиденко М.А., Беляева С.Ю., Присяжнюк Н.В. К расчету железобетонных плит, армированных стальным профилированным настилом, на выносливость и малоцикловую усталость // Міжвід. науково-техн. зб. наук. праць „Будівельні конструкції”. – Київ, НДІБК, 2005. – вип. 62 – С. 112 -117.

7. Беляева С.Ю. Міцність і деформативність залізобетонних плит, армованих сталевим профільованим настилом і поперечними анкерами: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій Держбуду України.. – Київ, 2006. – 20 с.

8. Панарин Н.Я., Онуфриев Н.М., Воронков Р.В., Багатурия Ф.И. Монолитные перекрытия с профилированной листовой арматурой / Бетон и железобетон. – 1975. - № 1. – С. 8-12.

9. Байков В.Н., Горбатов С.В., Димитров З.А. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей // Изв. Вузов. Сер. строительство и архитектура. – 1977. - №6. – С.15-18.

10. Паньшин Л.А., Симонов В.Л. Напряженно-деформированное состояние нормальных сечений / Бетон и железобетон. - № 7. – 1987. – С. 29-30.

11. Пирадов А.Б., Аробелидзе В.И., Хуцишвили Т.Г. К расчету несущей способности внецентренно-сжатых элементов / Бетон и железобетон. – 1986. - № 1 – С. 43 - 44.

12. Бамбура А.М. До аналітичного описання діаграми механічного стану бетону при одноразовому короткочасному навантаженні //



*Міжвід. науково-техн. зб. наук. праць „Будівельні конструкції”. – Київ: НДІБК, 2002. - Вип. 57. - С. 31 - 34.*

*13. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона // Бамбура А.Н., Бачинский В.Я., Журавлева Н.В., Пешкова И.Н. – Киев: НИИСК Госстроя СССР. - 1987. – 25 с.*

*Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Давиденко А.И.*