

УДК 624.016

**А. В. Голиков, И. М. Гаранжа, Н. И. Румянцев, А. Р. Федорова**

*Московский государственный строительный университет*

## **МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ БАЛКИ С ПРОФИЛИРОВАННЫМ НАСТИЛОМ В ГРАЖДАНСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

С развитием гражданского строительства становится актуальным вопрос применения новых конструктивных форм. Перспективным способом обеспечения несущей способности здания могут послужить сталежелезобетонные конструкции. Одним из вариантов сталежелезобетонных конструкций для создания систем перекрытия является комбинированная балка. Суть данной балки заключается в учете совместной работы стального профиля и железобетонной плиты, чтократно увеличивает прочность и жесткость конструкции. Поскольку сталежелезобетонные конструкции в гражданском строительстве применяются относительно недавно, требуется регулярное совершенствование нормативных документов и создание отработанных методик подбора и расчета комбинированных балок, а также способов оценки рациональности принятых решений.

Расчетные предпосылки приняты согласно своду правил и руководству по проектированию сталежелезобетонных конструкций. Источниками исходных параметров приняты соответствующие своды правил и ГОСТы на стальные двутавры, профилированные настилы и характеристики бетона. Расчет по прочности и жесткости проводился согласно методу предельных состояний. Уравнения равновесия для определения несущей способности сечения составлены на основании метода предельного равновесия. Результаты обработаны методами математической статистики. Критерий рационального сечения комбинированной балки сформулирован на основании абсолютной разницы максимального растягивающего усилия в стали и максимального сжимающего усилия в бетоне.

Определены максимальные изгибающие моменты и осевые моменты инерции для заданных комбинированных балок. Описан критерий рационального сечения комбинированной балки из условия максимального использования материалов сечения. Составлена методика подбора комбинированной балки. Предоставлен пример подбора согласно предложенной методике.

Установлена необходимость продолжения совершенствования методов расчета и подбора комбинированных балок. Сформулирован критерий эффективности комбинированной балки, зависящий от характеристик элементов сечения. Описанная методика расчета комбинированной балки ускоряет и упрощает процесс первоначального подбора элементов, входящих в комбинированное сечение.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** сталежелезобетонные конструкции, комбинированная балка, метод предельного равновесия, прочность, жесткость.

### **Введение**

К современным конструкциям промышленного и гражданского строительства предъявляются новые и новые требования, конструкции должны быть надежными, но легкими, а также экономичными и быстровозводимыми. В жилых и общественных зданиях дополнительно необходимо учитывать максимально допустимую строительную высоту по архитектурному заданию.

Стальные конструкции обладают рядом преимуществ: легкость, скорость монтажа, минимизация мокрых процессов. Также при возведении монолитных перекрытий часть времени и трудозатрат уходит на установку и разборку опалубки. То, как применение сталежелезобетонных конструкций при возведении перекрытий позволяет соблюсти предъявленные требования, описано в работе [1].

Сталежелезобетонная балка, или комбинированная балка, представляет собой конструкцию, в которой стальная балка и железобетонная плита объединены с помощью анкерных упоров либо за счет полного или частичного обетонирования стальной балки<sup>1</sup>.

История сталежелезобетона описана в работе [2], где говорится, что впервые идею учета совместной работы стали и бетона высказали в начале XX века Куагей Скотт в Англии и Френсис во Франции. Данная система получила распространение в 30—40-х гг. XX века в Америке и Европе, в областях мостостроения и высотных зданий, согласно [3].

Области применения комбинированных балок в России описаны в публикации [4]: в основном они ограничивались мостостроением и инфраструктурными сооружениями. Проработке методик расчета и проектирования мостовых сооружений посвящена работа [5].

В исследованиях [4, 6] отмечается, что применимость сталежелезобетонных конструкций в гражданском строительстве ограничена ввиду отсутствия полной и четкой нормативной базы по проектированию и изготовлению сталежелезобетонных конструкций. О необходимости совершенствования нормативной базы говорится в работе [7]

Поэтому в 2016 г. был разработан документ, регламентирующий сталежелезобетонные конструкции в промышленном и гражданском строительстве, а также руководство<sup>2</sup> к нему.

Если обратиться к СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования», то для определения максимальной несущей способности необходимо знать положение нейтральной оси (Н.О.) и, используя это значение, воспользоваться предложенными рисунками из раздела 6.2.1. Конкретных рекомендаций по определению положения Н.О. не приведено, лишь указано уравнение равновесия, согласно которому определяется Н.О. (п. 6.2.1.6). В свою очередь, в руководстве по проектированию даны формулы, позволяющие определить Н.О., однако только для комбинированных балок с обетонированным тавровым сечением (п. 3.1.2) и (п. 3.1.3). Комбинированная балка с профилированным настилом не рассмотрена, зато указан СТО<sup>3</sup>, позволяющий рассчитать некоторые варианты комбинированной балки с профилированным настилом. Последующие выкладки составлены в соответствии с п. 6.2.1 данного СТО.

Современные исследования предлагают различные подходы к расчету комбинированных балок с использованием двухлинейной диаграммы работы бетона из работы [6] и более сложных фактических эпюр напряжения в сечении в работе [8].

В зарубежной практике проектирование сталежелезобетонных конструкций регламентирует Eurocode<sup>4</sup> и AISC<sup>5</sup>. Предпосылки к расчету комбиниро-

<sup>1</sup> СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования (приказ Минстроя России от 30 дек. 2016. № 1030/пр).

<sup>2</sup> Руководство по проектированию сталежелезобетонных конструкций / Ассоциация развития стального строительства. М.: Аксиом Графикс Юнион, 2018. 116 с.

<sup>3</sup> СТО 57398459-035-2014. Плиты перекрытий зданий и сооружений сталежелезобетонные с применением стальных профилированных листов. Нормы проектирования.

<sup>4</sup> EN 1994-1-1 (2004). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC).

ванных балок описаны в работах [9, 10]. Актуальными задачами остаются исследования работы комбинированных балок в нелинейной постановке согласно [11], а также способы оптимизации подбора сечения согласно [12].

*Актуальность* данной работы основывается на необходимости увеличения объемов быстрого и качественного строительства в гражданском строительстве. Сталежелезобетонная технология позволяет ее обеспечить.

*Объектом исследования* является комбинированная балка — это сталежелезобетонная конструкция, состоящая из монолитной железобетонной плиты и стальной балки, объединенных для совместной работы. В данном исследовании в качестве стальной балки используются двутавровые профили широкополочного типа, согласно ГОСТ 35087<sup>6</sup>, с опиранием плиты по профилированному настилу, согласно ГОСТ Р 58389<sup>7</sup>, на верхний пояс. Для учета совместной работы предполагается, что стальная балка и плита объединены с помощью анкерных упоров.

*Предметом исследования* являются расчетные критерии предельных состояний, а именно прочность комбинированной балки, определяемая максимальным изгибающим моментом, и жесткость комбинированной балки, определяемая максимальным прогибом между опорами.

*Цель исследования* заключается в нахождении параметра, позволяющего оценить рациональность сечения комбинированной балки; предложить методику эффективного подбора сечения комбинированной балки.

*Научная новизна* заключается в определении границы области оптимальных значений комбинированных балок по критерию эффективного использования сечения.

*Практическая значимость* исследования дает представление о том, как оценить принятое проектное решение по критерию рационального использования материала элементов сечения, а также методику подбора комбинированной балки по профилированному настилу.

*Задачи исследования*, необходимые для достижения цели, формулируются следующим образом:

- Выполнен критический анализ материалов, посвященных расчету сталежелезобетонных конструкций. Обобщены методы подбора комбинированных балок отечественных и зарубежных источников.
- Определен критерий эффективности комбинированной балки при расчете на прямой поперечный изгиб, который выражает максимальное использование материалов сечения.
- Предложена методика подбора комбинированной балки с профилированным настилом с опиранием на верхние полки.

#### **Материалы и методы**

В качестве исходных данных определим характеристики для стальной балки, железобетонной плиты, профилированного настила.

<sup>5</sup> Design Guide 2: Steel and Composite Beams with Web Openings / American Institute of Steel Construction.

<sup>6</sup> ГОСТ 35087—2024. Двутавры стальные горячекатаные. Технические условия.

<sup>7</sup> ГОСТ Р 58389—2019. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для сталежелезобетонных конструкций. Технические условия.

### Стальная балка

Геометрические характеристики сечения приняты по табл. 1 из ГОСТ 35087 согласно рис. 1.

Характеристики стали приняты согласно табл. Б.1 и В.4 соответствующего свода правил<sup>8</sup>:

- модуль упругости стали:  $E_s = 2,06 \cdot 10^5$  МПа;
- расчетное сопротивление для стали С355Б:  $R_y = 345$  МПа.

### Железобетонная плита

Характеристики тяжелого бетона, согласно табл. 6.8 и 6.11, а также табл. 6.12 соответствующего свода правил<sup>9</sup>:

- расчетное сопротивление на сжатие бетона в 30:  $R_b = 17$  МПа;
- начальный модуль упругости бетона:  $E_b = 32,5 \cdot 10^3$  МПа;
- коэффициент ползучести бетона при относительной влажности воздуха 40...75 % окружающей среды:  $\varphi_{b,cr} = 2,3$ .

### Профилированный настил

Геометрические характеристики сечения приняты по табл. 12 из ГОСТ Р 58389 и рис. 12 из ГОСТ Р 58389, общий вид профилированного настила приведен на рис. 1.

Высота полки настила:  $h_n = 75$  мм.

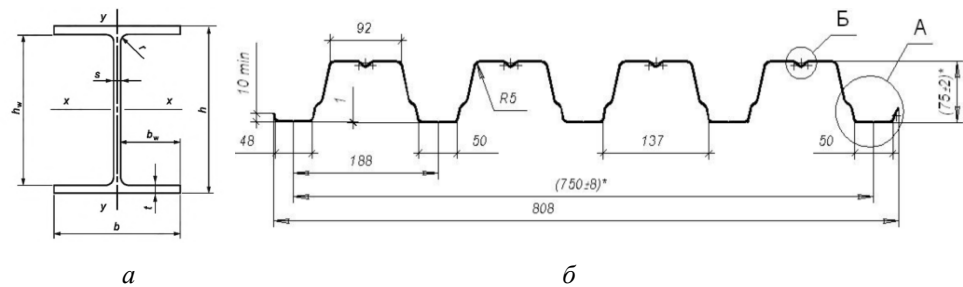


Рис. 1. Элементы сечения комбинированной балки:  
а — сечение стальной балки; б — сечение профилированного листа

### Объединенное сечение

Общий вид поперечного сечения комбинированной балки представлен на рис. 2. Поскольку расчетное сечение может проходить через область только с железобетонной плитой над верхними полками настила, в расчетное сечение включается двутавровый профиль и на заданном расстоянии железобетонная плита в виде прямоугольника (см. рис. 2).

*Матрица исследования, в которой будут состоять границы рассматриваемой работы.*

Рассмотрим 27 композитных балок (КБ), варьируемыми параметрами будут номер стального профиля и толщина плиты над настилом. Составим три серии согласно толщине бетона над верхними полками настила:

<sup>8</sup> СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализир. ред. СНиП II-23—81\* (приказ Минстроя России от 27 фев. 2017 № 126/пр).

<sup>9</sup> СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

- 1) КБ1.1—КБ1.9:  $h_f = 45$  мм, общая толщина плиты  $h_{nb} = 120$  мм;
- 2) КБ2.1—КБ2.9:  $h_f = 65$  мм, общая толщина плиты  $h_{nb} = 140$  мм;
- 3) КБ3.1—КБ3.9:  $h_f = 85$  мм, общая толщина плиты  $h_{nb} = 160$  мм.

Все возможные типоразмеры представлены в табл. 1. Общий вид серий представлен на рис. 3.

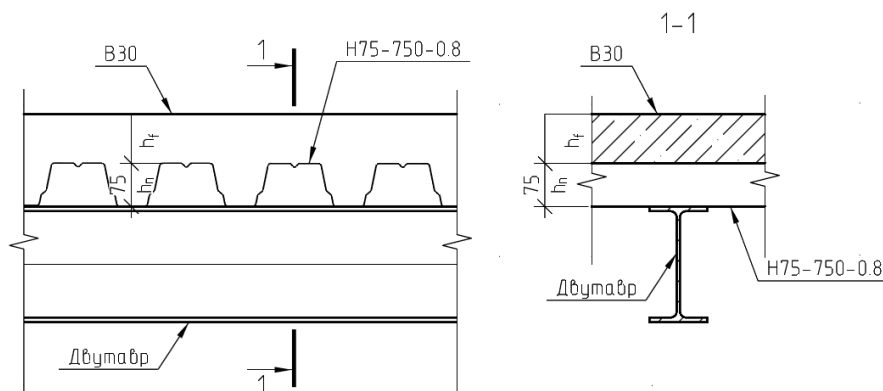


Рис. 2. Рассматриваемое сечение комбинированной балки

Таблица 1

Типоразмеры комбинированных балок

№ / $h_f$	20Ш1	25Ш1	30Ш1	35Ш1	40Ш1	45Ш1	50Ш1	60Ш1	70Ш1
45 мм	КБ1.1	КБ1.2	КБ1.3	КБ1.4	КБ1.5	КБ1.6	КБ1.7	КБ1.8	КБ1.9
65 мм	КБ2.1	КБ2.2	КБ2.3	КБ2.4	КБ2.5	КБ2.6	КБ2.7	КБ2.8	КБ2.9
85 мм	КБ3.1	КБ3.2	КБ3.3	КБ3.4	КБ3.5	КБ3.6	КБ3.7	КБ3.8	КБ3.9

Во всех последующих расчетах зададимся одинаковым шагом балок  $b = 3$  м; согласно СТО 57398459, данная величина обусловлена несущей способностью железобетонной плиты.

В расчетах по второму предельному состоянию во всех зависимостях максимального вертикального прогиба примем нормативную погонную нагрузку  $q_n = 10$  кН/м — относительно этой величины будет введен поправочный коэффициент.

Согласно п. 6.2.1.6 СП 266.1325800.2016, в случае если для стальной части сечения применяется диаграмма напряжений, как для идеального жесткопластического материала (рис. 4), расчет по прочности нормальных сечений следует производить из условия жесткопластичного материала (см. рис. 4), расчет по прочности нормальных сечений следует проводить из условия

$$M \leq \gamma_{b1} R_b A_b y_b + \sum \gamma_{c,i} R_{y,i} A_{st,i} y_{st,i}, \quad (1)$$

где  $i$  — индекс, соответствующий участкам сечения с одинаковым напряжением;  $\gamma_{b1}$  — коэффициент условий работы бетона,  $\gamma_{b1} = 1,0$  по п. 6.1.12

СП 63.13330.2018;  $A_b$  — площадь железобетонной части сечения;  $y_b$  — расстояние от центра тяжести железобетонной части сечения до оси, относительно которой вычисляются моменты;  $R_{y,i}$  — расчетное сопротивление  $i$ -го участка стального сечения с одинаковым напряжением до оси;  $\gamma_{c,i}$  — коэффициент условий работы стали,  $\gamma_c = 1,0$  по табл. 1 СП 16.13330.2017;  $A_{st,i}$  — площадь стального сечения с одинаковым напряжением до оси;  $y_{st,i}$  — расстояние от центра тяжести  $i$ -го участка стального сечения с одинаковым напряжением до оси, относительно которой вычисляются моменты.

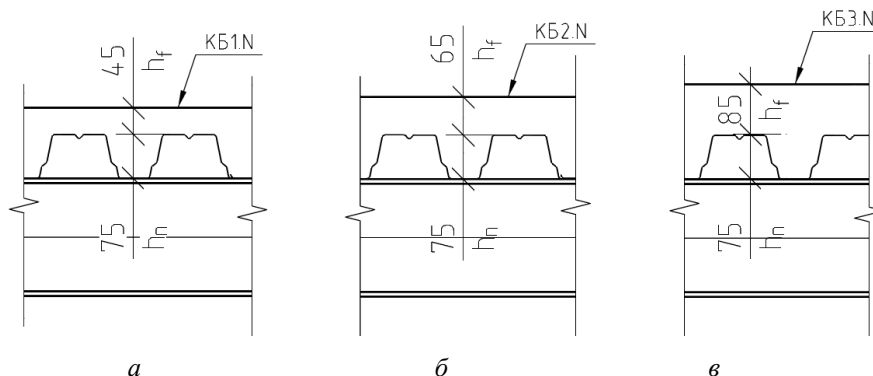


Рис. 3. Серии комбинированных балок: *а* — серия КБ1.1—КБ1.9; *б* — серия КБ2.1—КБ2.9; *в* — серия КБ3.1—КБ3.9

В данных расчетах положение Н.О. определяется величиной  $x$ , причем ось отсчета можно взять произвольную, значение  $x$  определяется исходя из условия равновесия сил вдоль оси, направленной по нормали рассчитываемого сечения.

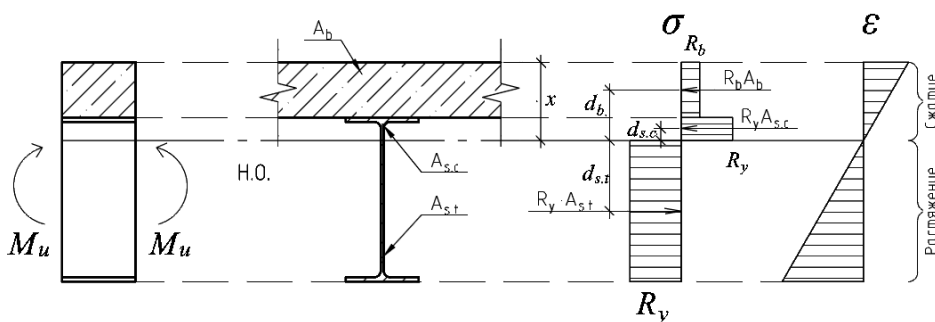


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние в поперечном сечении комбинированной балки

Положение границы сжатой зоны поперечного сечения определяется из условия п. 6.2.1.6 СП 266.1325800.2016:

$$R_b A_b + R_y A_{s.c} - R_y A_{s.t} = 0, \quad (2)$$

где  $A_{s,t}$  — площадь стальной растянутой части сечения;  $A_{s,c}$  — площадь стальной сжатой части сечения.

Таким образом, потенциально возможно три положения Н.О.: в бетоне плиты, в полке стальной балки, в стенке стальной балки (рис. 5).

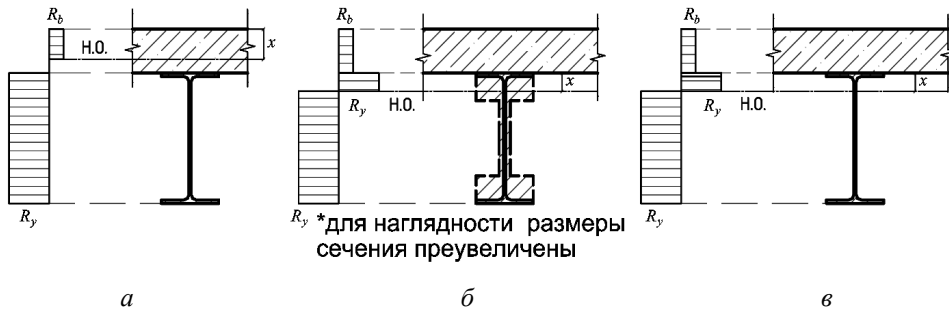


Рис. 5. Возможные положения Н.О. в поперечном сечении:  
 а — в плите; б — в полке; в — в стенке

Стоит отметить несколько особенностей. Нормативные требования не учитывают работу бетона при растяжении, это значит, что при прохождении Н.О. в плите площадь растянутого бетона не учитывается в расчетах, по сути, этот материал не вовлечен в работу сечения. При прохождении Н.О. в стенке часть стального сечения сжимается, что для стали нерационально, необходимо учитывать потерю устойчивости стенки.

Для выполнения уравнения равновесия фактические продольные силы сжатия и растяжения должны быть равны друг другу. Величина фактических продольных сил определяется соответствующей площадью, в свою очередь, площадь зависит от положения Н.О.

Положение Н.О. зависит от соотношения максимальных растягивающих сил в бетоне  $N_b$  и максимальных растягивающих сил в стали  $N_s$ :

$$N_b = R_b b_{eff} t_b, \quad (3)$$

где  $b_{eff}$  — расчетная ширина плиты, определяемая в соответствии с п. 4.4.4.9 СП 266.1325800.2016;  $t_b$  — толщина железобетонной плиты.

$$N_s = R_y A_s. \quad (4)$$

Для определения области Н.О. необходимо сравнить  $N_b$  и  $N_s$ : если  $N_b > N_s$ , то можно сделать вывод, что бетон частично сжат, потому что его неполной площади достаточно для уравновешивания полностью растянутого стального сечения (рис. 6).

Тогда из уравнения равновесия можно выразить высоту сжатой зоны:

$$h_x = \frac{R_y A_s}{b_b b_{eff}}. \quad (5)$$

Для определения максимального изгибающего момента необходимо расписать формулу (1), в качестве относительной оси выбрана граница между сталью и бетоном:

$$M_u = \gamma_{b1} R_b b_{eff} h_x \left( t_b - \frac{h_x}{2} \right) + \gamma_c R_y A_s \left( \frac{h}{2} \right). \quad (6)$$

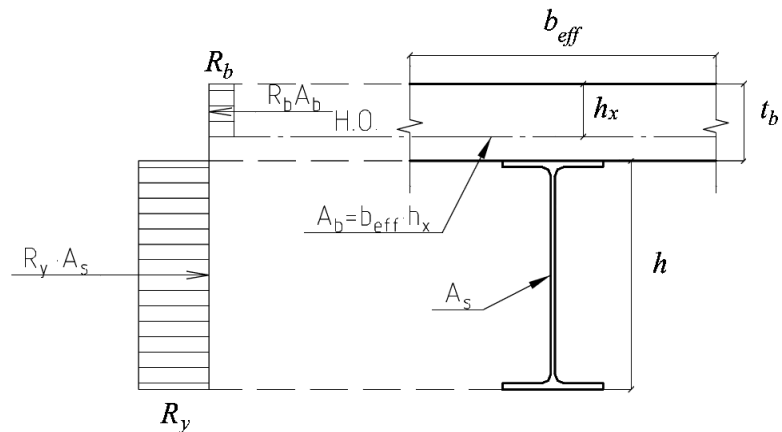


Рис. 6. Расчетный случай при Н.О. в плите

Если выполняется условие  $N_b < N_s$ , то Н.О. проходит в стальном сечении. В таком случае вся толщина бетона будет сжата, а также часть стали из-за необходимости выполнения условия равновесия.

Если Н.О. проходит через полку стального сечения, то часть полки сжата, а остальная часть стали сечения растянута (рис. 7). В этом случае выполняется уравнение

$$R_b b_{eff} t_b + R_y b_f x = R_y (A_s - b_f x),$$

откуда, выражая  $x$ , получим положение Н.О. в полке:

$$x = \frac{R_y A_s - R_b b_{eff} t_b}{2 R_y b_f}. \quad (7)$$

Данную величину необходимо сравнить с толщиной полки  $t_f$ : если толщина полки больше  $x$ , то предположение сделано верно, а уравнение максимального момента относительно границы бетона и стали записывается так:

$$M_u = \gamma_{b1} R_b b_{eff} \left( \frac{t_b^2}{2} \right) + \gamma_c R_y A_s \left( \frac{h}{2} \right) - \gamma_c 2 R_y b_f \left( \frac{x^2}{2} \right). \quad (8)$$

Если же толщина полки меньше, чем полученная величина, то предположение, что Н.О. проходит в полке, неверно, а значит, Н.О. находится в стенке (рис. 8).

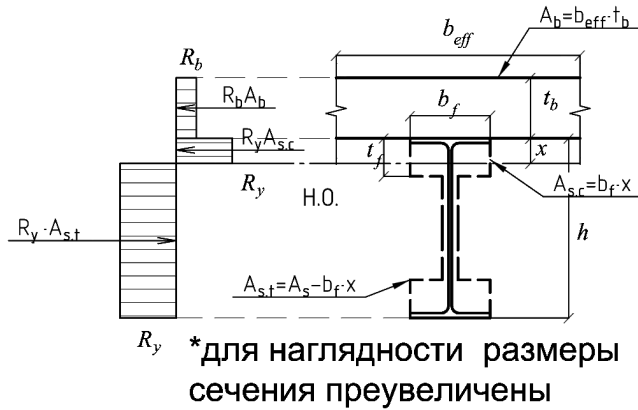


Рис. 7. Расчетный случай при Н.О. в полке

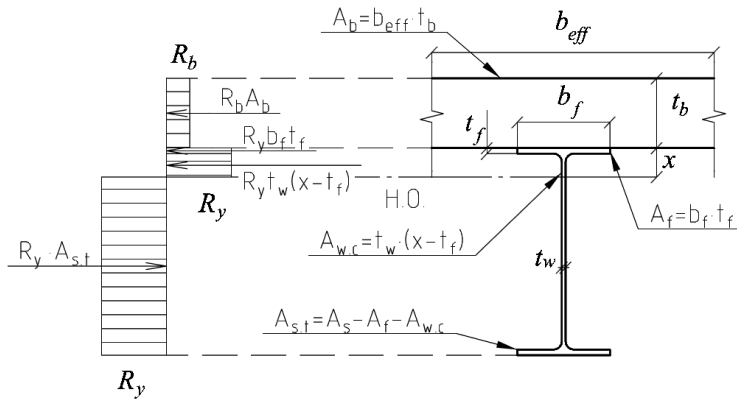


Рис. 8. Расчетный случай при Н.О. в стенке

Составляя уравнение равновесия, получим:

$$R_b b_{eff} t_b + R_y b_f t_f + R_y t_w (x - t_f) = R_y (A_s - b_f t_f - t_w (x - t_f)),$$

откуда, выражая  $x$ , определим уравнение Н.О.:

$$x = \frac{R_y A_s - R_b b_{eff} t_b - 2 R_y t_w (x - t_f)}{2 R_y b_f}. \quad (9)$$

Подставляя  $x$  в уравнение, окончательно имеем максимальный изгибающий момент для положения Н.О. в стенке балки:

$$M_u = \gamma_b R_b b_{eff} \left( \frac{t_b^2}{2} \right) + \gamma_c R_y A_s \left( \frac{h}{2} \right) - \gamma_c 2 R_y b_f \left( \frac{t_f^2}{2} \right) - \gamma_c 2 R_y t_w \left( \frac{x^2 - t_f^2}{2} \right). \quad (10)$$

Таким образом, зная характеристики материалов сечения, геометрические параметры входящих элементов сечения, расположение их относительно друг друга, можно получить однозначную аналитическую зависимость для максимального изгибающего момента.

Для определения прочности по первому предельному состоянию необходимо сравнить значение максимального изгибающего момента с расчетным значением определенного с помощью методов строительной механики или вычислительных комплексов.

Проверка по второму предельному состоянию по жесткости осуществляется в предположении упругой работы бетона (в соответствии с п. 6.2.6 СП 266.1325800.2016). В расчетах сталежелезобетонных конструкций следует применять коэффициент приведения (в соответствии с п. 4.4.4.2 СП 266.1325800.2016):

$$\alpha_b = \frac{E_{st}}{E_{bl}}, \quad (11)$$

где  $E_{st}$  — модуль упругости конструкционного металла стальной части;  $E_{bl}$  — модуль деформации бетона при сжатии и растяжении в зависимости от продолжительности действия нагрузки.

В соответствии с правилами сопротивления материалов и прил. Г.1 из СП 266.1325800.2016 определяются геометрические характеристики приведенного сечения:

$$I_{red} = I_b + I_s \cdot \alpha_{s2} + I'_s \cdot \alpha_{s1}, \quad (12)$$

где  $I_b$  — момент инерции сжатой зоны бетона относительно центра тяжести приведенного без учета бетона растянутой зоны поперечного сечения;  $I_s, I'_s$  — моменты инерции сечения растянутой стальной части, сжатой стальной части и настила соответственно относительно центра тяжести приведенного сечения.

Максимальный вертикальный прогиб определяется согласно п. 4.4.3.3 СП 266.1325800.2016, согласно общепринятым правилам строительной механики по формуле

$$f_{max} = k \frac{q^n l^4}{E_s I_{red}}, \quad (13)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от типа опирания.

В данной работе рассматривается разрезная шарнирно-опертая балка с линейной равномерно распределенной погонной нагрузкой, поэтому  $k = \frac{5}{384}$ .

### Результаты

Подставляя значения в выражение (4), определим область нахождения Н.О. Из выражений (5), (7), (9) получим положения Н.О. Подставляя параметры в (6), (8), (10), найдем максимальный изгибающий момент для каждого сечения.

Результаты расчетов КБ1.1—КБ3.9, а также максимальный момент соответствующего стального сечения представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Максимальные изгибающие моменты заданных сечений

Профиль	Двутавр	КБ1.N	КБ2.N	КБ3.N
	$M_{ult}$ , кНм	$M_{ult.c}$ , кНм	$M_{ult.c}$ , кНм	$M_{ult.c}$ , кНм
20Ш1	95	274 (188 %)	301 (217 %)	328 (245 %)
25Ш1	173	433 (150 %)	472 (173 %)	510 (195 %)
30Ш1	266	591 (122 %)	656 (147 %)	706 (165 %)
35Ш1	353	702 (99 %)	800 (127 %)	858 (143 %)
40Ш1	550	964 (75 %)	1102 (100 %)	1221 (122 %)
45Ш1	879	1395 (59 %)	1540 (75 %)	1701 (94 %)
50Ш1	864	1416 (64 %)	1559 (80 %)	1718 (99 %)
60Ш1	1217	1947 (60 %)	2091 (72 %)	2254 (85 %)
70Ш1	1719	2709 (58 %)	2843 (65 %)	3013 (75 %)

Эти данные обобщены на рис. 9, откуда видно, как изменяются максимальные изгибающие моменты для широкополочных двутавров.

В табл. 2 в столбцах с максимальным изгибающим моментом комбинированных балок в скобках также указано процентное увеличение несущей способности по сравнению со стальным сечением.

Отсюда видно, что наибольшее процентное увеличение происходит у наименьших двутавров, а с повышением номера профиля вклад железобетонной плиты уменьшается. Это объясняется соотношением между габаритами стального сечения и железобетонной плиты. Чем больше размеры железобетонной плиты, тем большую часть изгибающего момента плита может воспринять. Этот факт необходимо учитывать при подборе элементов сечения комбинированной балки.

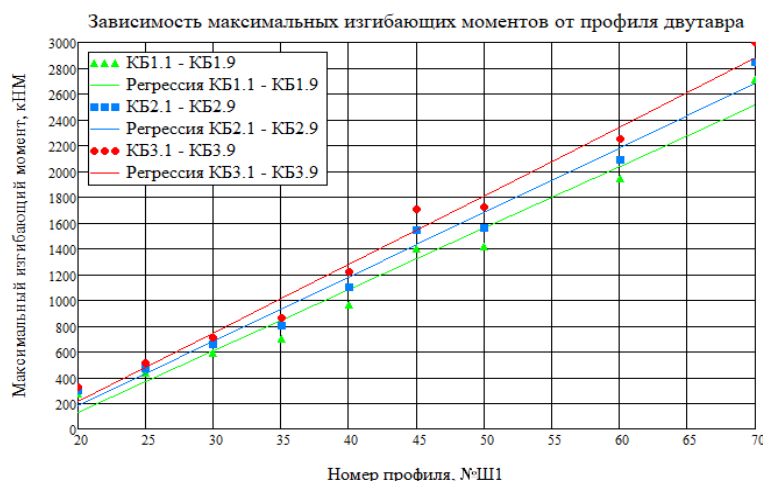


Рис. 9. Зависимость максимального изгибающего момента от профиля двутавра

Также на рис. 10 представлены максимальные продольные силы в бетоне и стали согласно выражениям (3) и (4). Можно заметить следующие особенности: с уменьшением толщины плиты уменьшается и максимальная продольная сила в бетоне.

Из уравнений равновесия, усилия в стали в бетоне должны быть одинаковыми. То есть, если разница в усилиях не используется, уравнение моментов составляется по наименьшему усилию. Это говорит о том, что сталь и бетон будут наиболее задействованы при  $N_b - N_s = 0$ .

Ввиду того, что параметры двутавров и плиты дискретны, введем величину  $|N_b - N_s|$ , описывающую абсолютную разницу между усилиями. Варьируя параметр  $|N_b - N_s|$ , можно оценить, насколько задействованы материалы в сечении. Отообразим эту разницу на рис. 11.

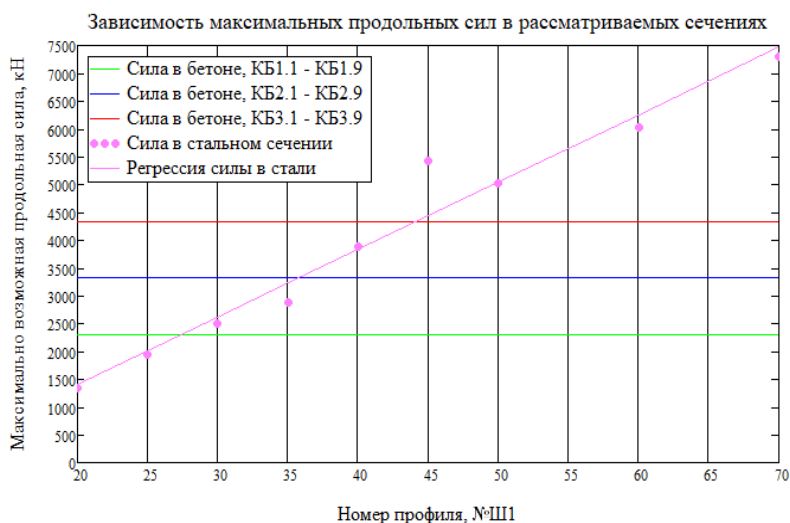


Рис. 10. Зависимость максимальных продольных сил от номера профиля

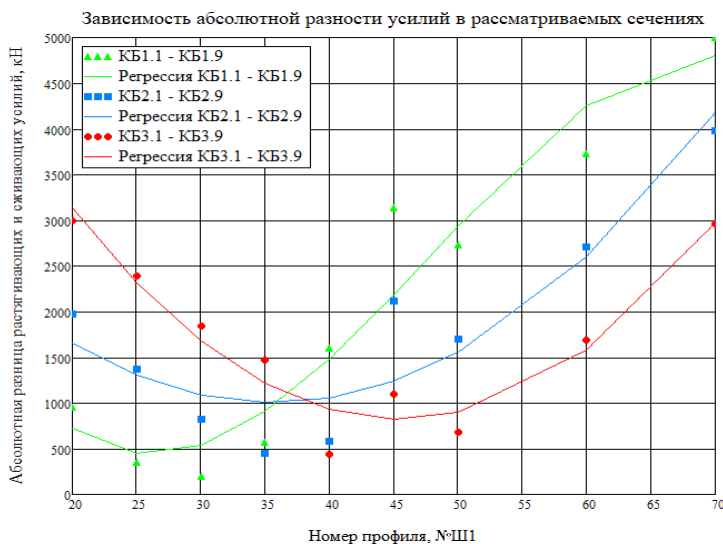


Рис. 11. Абсолютная разница между сжимающими и растягивающим усилиями в поперечном сечении

Из рис. 11 видно, что при более толстой плите точка экстремума (КБ3.6) зависимости  $|N_b - N_s|$  наступает дальше по размерному ряду, а для более тонкой плиты наступает раньше (КБ1.2). На данные соотношения стоит обращать внимание при подборе комбинированной балки по прочности.

Для расчета по второму предельному состоянию необходимо определить приведенный момент инерции комбинированной балки согласно выражению (13), расчет производится по правилам сопротивления материалов. В результате составим табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Моменты инерции заданных сечений

Профиль	Двутавр	КБ1.N	КБ2.N	КБ3.N
	$I_S, \text{см}^4$	$I_{\text{red}}, \text{см}^4$	$I_{\text{red}}, \text{см}^4$	$I_{\text{red}}, \text{см}^4$
20Ш1	2689	11 996 (346 %)	14 517 (440 %)	17 021 (533 %)
25Ш1	6121	20 709 (238 %)	24 951 (308 %)	28 931 (373 %)
30Ш1	11 338	31 842 (181 %)	38 057 (236 %)	43 845 (287 %)
35Ш1	17 107	42 640 (149 %)	50 556 (196 %)	57 858 (238 %)
40Ш1	30 554	64 963 (113 %)	76 534 (150 %)	87 258 (186 %)
45Ш1	56 069	10 2318 (82 %)	119 191 (113 %)	135 053 (141 %)
50Ш1	60 366	111 707 (85 %)	129 704 (115 %)	146 353 (142 %)
60Ш1	102 709	17 3931 (69 %)	199 532 (94 %)	223 208 (117 %)
70Ш1	17 2424	269 799 (56 %)	305 826 (77 %)	339 297 (97 %)

В табл. 3 в столбцах с осевым моментом инерции комбинированных балок в скобках указан процент увеличения по сравнению со стальным сечением. Откуда видно, что добавление железобетонной плиты увеличивает момент инерции до пяти раз. Также значение момента инерции сильно зависит от толщины плиты  $h_f$ .

Представим номограммы (рис. 12—14) для каждой серии КБ. В них отражена зависимость максимального прогиба от пролета при погонной нагрузке  $q_n = 10 \text{ кН/м}$ .

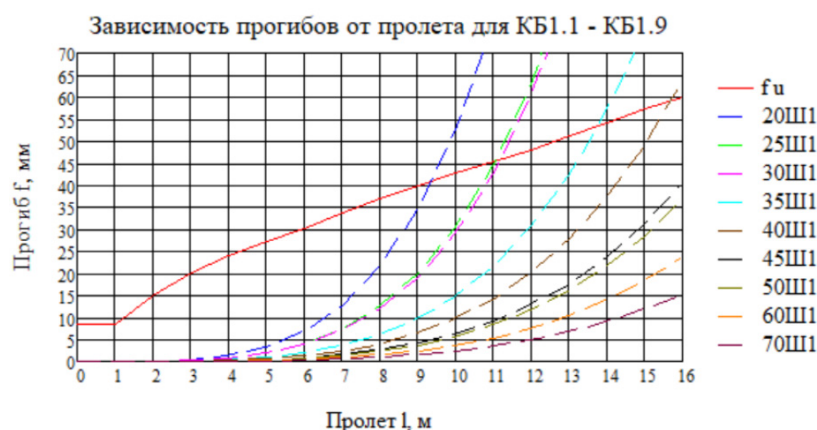


Рис. 12. Зависимость прогибов от пролета для КБ1.1—КБ1.9

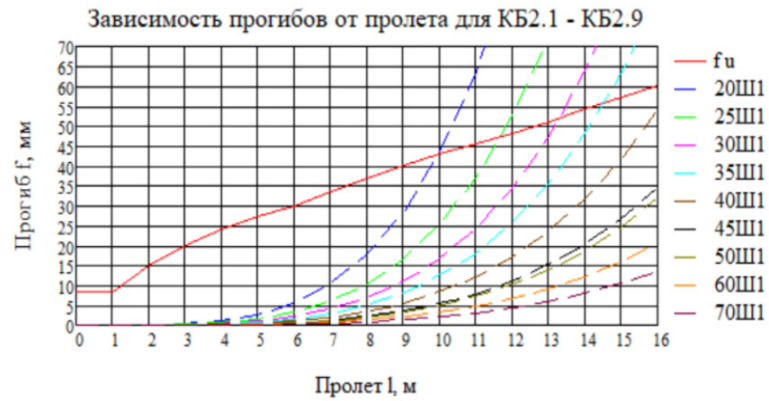


Рис. 13. Зависимость прогибов от пролета для КБ2.1—КБ2.9

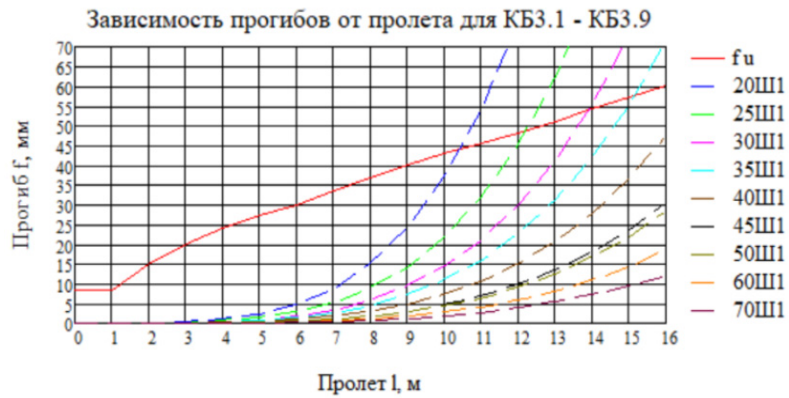


Рис. 14. Зависимость прогибов от пролета для КБ3.1—КБ3.9

Для получения действительных прогибов определяется переходной коэффициент:

$$\delta_f = \frac{q_n \text{ кН/м}}{10 \text{ кН/м}}, \quad (14)$$

где  $q_n$  — действующая нормативная погонная нагрузка на балку.

Из выражения (13) видно, что  $f_{\max} \sim q_n$ , таким образом значение  $f_{\max}$  можно получить из уравнения (14), умножив его на  $\delta_f$ :

$$f_{\max} = \frac{5}{384} \frac{10 \text{ кН/м} \cdot l^4}{E_s I_{\text{ред}}} \delta_f. \quad (15)$$

*Окончательная методика* состоит из следующих пунктов:

- Сбор исходных данных для расчета. Проектировщик назначает шаг балок согласно рекомендациям. Также он принимает характеристики бетона, характеристики настила и вертикальные нагрузки, пролет, строительную высоту.

• Определение параметров для подбора. По правилам строительной механики или средствами вычислительного комплекса проектировщик определяет  $M_{\max}$ ,  $q_n$ .

• Назначение характеристик элементов сечения. По рис. 8 назначает толщину плиты и номер сечения.

• Определение номинального прогиба. Зная пролет, толщину плиты и номер профиля (см. рис. 11—13), определяется прогиб  $f^{(10)}$  для  $q_n = 10$  кН/м.

• Определение предполагаемого прогиба. Считается  $\delta_f$  и умножается  $\delta_f \cdot f^{(10)}$  — определяется действительная величина вертикального прогиба.

• Анализ полученных значений. Если величина прогиба меньше предельного, то сечение удовлетворяет, если больше, то необходимо ввести поправку большего сечения.

• Проверка принятого сечения. Производятся проверки согласно выражениям (1)—(15).

Приведем пример подбора композитной балки согласно приведенной методики. Рассмотрим перекрытие общественного здания с сеткой колонн  $12 \times 12$  м (рис. 15).

Сбор исходных данных для расчета.

Принимаем толщину и материалы железобетонной плиты.

Бетон ( $b$ ), бетон класса В30:

$R_b = 17$  МПа;  $E_b = 32,5 \cdot 10^3$  МПа;  $\varphi_{b,cr} = 2,3$ ;  $\rho_b = 25$  кН/м<sup>3</sup>;  $h_f = 65$  мм —

толщина бетона над верхними полками настила.

Принимаем профилированный настил.

Настил ( $n$ ). Н75-750-0.8, узкими полками вниз:

$h_n = 75$  мм;  $S_n = 188$  мм;  $b_{nt} = 50$  мм;  $b_{nw} = 92$  мм;  $b_0 = 71$  мм;

$\rho_n = 11,2$  кг/м<sup>2</sup> = 0,11 кПа;  $\gamma_f = 1,05$ .

$h_{nb} = h_f + h_n = 65$  мм + 75 мм = 140 мм — общая толщина плиты.

Определение приведенной толщины бетона:

$$h_b = \frac{b_{nt} + b_{nw}}{2S_n} h_n = \frac{50 + 92}{2 \cdot 188} \cdot 75 = 28 \text{ мм};$$

$$h_{b,eq} = h_b + h_f = 28 + 65 = 93 \text{ мм} = 0,093 \text{ м}.$$

По правилам проектирования<sup>10</sup> назначены нагрузки и соответствующие коэффициенты нагрузки  $\gamma_f$ . Сбор нагрузок представлен в табл. 4.

Расчетная равномерно распределенная нагрузка составляет:

$$p = 2,8 + 0,12 + 0,15 + 1,8 + 0,6 + 2,4 = 7,87 \text{ кН/м}^2.$$

Нормативная равномерно распределенная нагрузка составляет:

<sup>10</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализир. ред. СНиП 2.01.07-85\* (приказ Минстроя России от 3 дек. 2016. № 891/пр).

$$p^n = 2,33 + 0,11 + 0,14 + 1,5 + 0,5 + 0,35 \cdot 2 = 5,28 \text{ кН/м}^2.$$

Т а б л и ц а 4

Сбор нагрузок для комбинированной балки

Наименование	Нормативное значение, кПа	$\gamma_f$	Расчетное значение, кПа
<i>Постоянные</i>			
Ж/б плита приведенной толщины, $h_{b,eq} = 0,093 \text{ м}, \rho_b = 25 \text{ кН/м}^3$	2,33	1,2	2,8
Несъемная опалубка, настил Н75-750-0.8	0,11	1,05	0,12
Вес полов	1,5	1,2	1,8
Вес перегородок	0,5	1,2	0,6
<i>Временные</i>			
Полезная нагрузка	2	1,2	2,4

Исходные габариты.

По проекту принимаем пролет  $l = 12 \text{ м}$ . Шаг балок принимаем из расчета плиты и рекомендаций:  $b = 3 \text{ м}$ , гофры поперек балки.

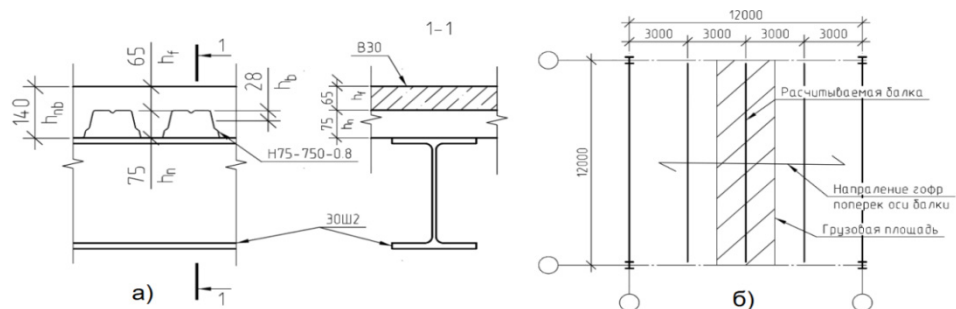


Рис. 15. К расчету комбинированной балки: а — рассматриваемое сечение; б — рассчитываемая ячейка здания

1. Определение параметров для подбора.

Погонная расчетная нагрузка на рядовую балку:

$$q = p \cdot b = 7,87 \text{ кН/м}^2 \cdot 3 \text{ м} = 23,61 \text{ кН/м}.$$

Погонная нормативная нагрузка на рядовую балку:

$$q^n = p^n \cdot b = 5,28 \text{ кН/м}^2 \cdot 3 \text{ м} = 15,84 \text{ кН/м}.$$

Максимальный изгибающий момент в середине пролета:

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{23,61 \text{ кН/м} (12 \text{ м})^2}{8} = 425 \text{ кНм}.$$

2. Назначение характеристик элементов сечения.

Расчетная ширина плиты согласно п. 4.4.4.9 СП 266.1325800.2016:

$$b_{eff} = 2 \cdot \min\left(\frac{b}{2}, \frac{l}{8}\right) = 2 \cdot \min\left(\frac{3}{2}, \frac{12}{8}\right) = 3 \text{ м.}$$

Согласно рис. 16, на оси  $Y$  отмечены максимальные изгибающие моменты; откладывая  $M_{max} = 425$  кНм, перейдем к линии, соответствующей регрессии (КБ2.1—КБ2.9). Опустившись из данной точки на ось  $X$ , определим профиль, удовлетворяющий критерию прочности 25Ш1. Также и все последующие профили будут удовлетворять критерию прочности.

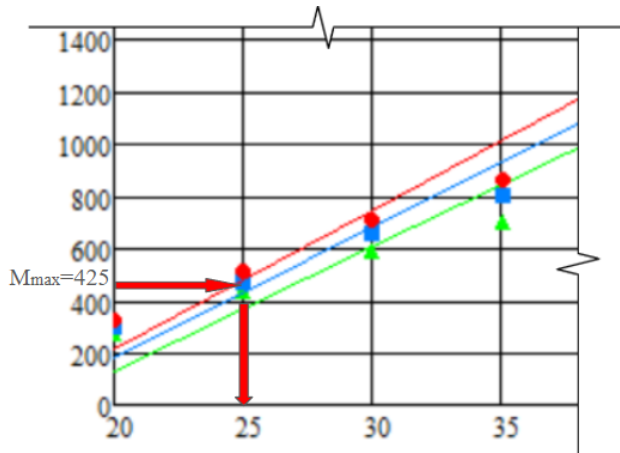


Рис. 16. К подбору по изгибающему моменту

### 3. Определение номинального прогиба.

Выберем номограмму, соответствующую принятой толщине плиты (КБ2.1—КБ2.9) (рис. 17).

Для двутавра 25Ш1 номинальный предполагаемый прогиб составляет  $f_{max}^{(10)} \approx 35$  мм. Из рис. 17 видно, что номинальный прогиб заведомо больше предельного (красная кривая), отсюда можно сделать вывод, что требуется принять следующее сечение — 30Ш1.

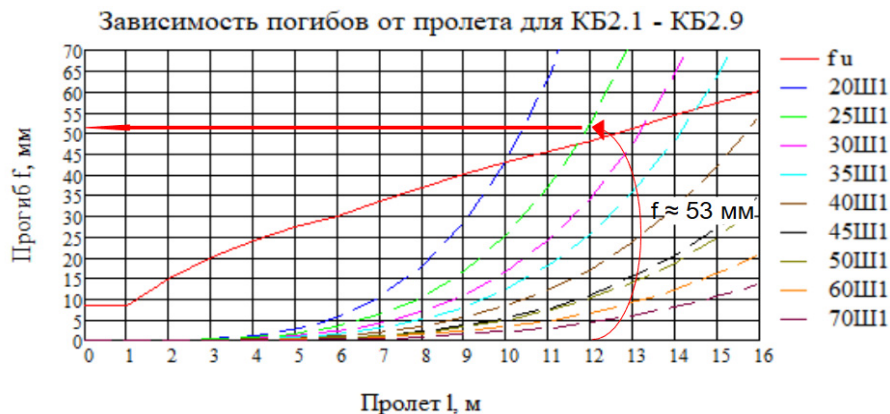


Рис. 17. Определение номинального прогиба

#### 4. Определение предполагаемого прогиба.

Таким образом, для комбинированной балки с сечением 30Ш1, согласно рис. 18, номинальный прогиб составит  $f_{\max}^{(10)} \approx 35$  мм.

Воспользуемся номинальным коэффициентом:

$$\delta_f = \frac{q_n \text{ кН/м}}{10 \text{ кН/м}} = \frac{15,84 \text{ кН/м}}{10 \text{ кН/м}} = 1,584,$$

откуда предполагаемый  $f_{\max}^{\delta} \approx f_{\max}^{(10)} \cdot \delta_f = 35 \text{ мм} \cdot 1,584 = 55 \text{ мм}$ .

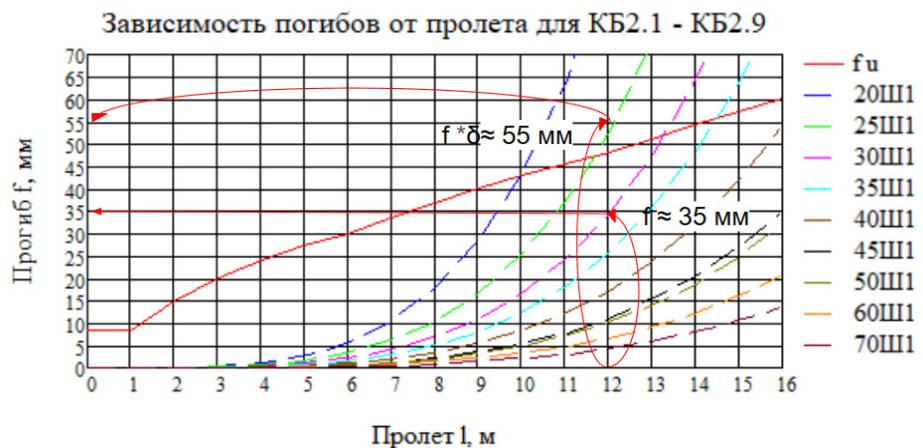


Рис. 18. Определение предполагаемого прогиба

#### 5. Анализ полученных значений.

Рассмотрев кривую 30Ш1, установили, что номинальный прогиб составляет  $f_{\max}^{(10)} \approx 35$  мм, в то время как предполагаемый прогиб составляет  $f_{\max}^{\delta} \approx f_{\max}^{(10)} \cdot \delta_f = 35 \text{ мм} \cdot 1,584 = 55$  мм.

Для пролета 12 м, согласно СП 20.13330.2016, вертикальный предельный прогиб составляет  $f_u = \frac{l}{250} = \frac{12\,000 \text{ мм}}{250} = 48$  мм.

Ввиду относительной близости  $48 \text{ мм} \approx 55 \text{ мм}$  примем следующий по номеру профиль — 30Ш2.

#### 6. Проверка принятого сечения.

В данном расчете примем:

стальное сечение ( $s$ ) — 30Ш2; сталь С355Б;

$$R_y = 345 \text{ МПа}; E_s = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Двутавр 30Ш2.

$$h_s = 300 \text{ мм}; b_f = 201 \text{ мм}; t_w = 9 \text{ мм}; t_f = 15 \text{ мм}; A_s = 87,38 \text{ см}^2;$$

$$I_y = 14\,209,66 \text{ см}^4; W_y = 947,3 \text{ см}^3; \gamma_f = 1,05.$$

Проверка прочности.

Положение нейтральной оси.

Максимальное сжатие в бетоне:

$$N_b = R_b b_{eff} h_f = 17 \text{ МПа} \cdot 3 \text{ м} \cdot 65 \text{ мм} = 3315 \text{ кН}.$$

Максимальное сжатие в стали:

$$N_s = R_y A_s = 345 \text{ МПа} \cdot 87,38 \text{ см}^2 = 3015 \text{ кН}.$$

Так как  $N_b = 3315 \text{ кН} > N_s = 3015 \text{ кН}$ , Н.О. проходит через бетон, для выполнения условия равновесие должно соблюдаться равенство

$$R_b b_{eff} h_x = R_y A_s,$$

откуда

$$h_c = \frac{R_y A_s}{b_b b_{eff}} = \frac{345 \text{ МПа} \cdot 87,38 \text{ см}^2}{17 \text{ МПа} \cdot 3 \text{ м}} = 59 \text{ мм}.$$

Также  $|N_b - N_s| = |3315 - 3015| = 300 \text{ кН}$ ; анализируя рис. 10, можно сделать вывод, что для КБ2 значение критерия меньше составленного, т. е. критерий эффективности выполнен.

Предельный изгибающий момент для такого положения Н.О. определяется так:

$$M_u = R_b b_{eff} h_x \left( h_{nb} - \frac{h_x}{2} \right) + R_y A_s \left( \frac{h_s}{2} \right).$$

$$M_u = 17 \text{ МПа} \cdot 3 \text{ м} \cdot 59 \text{ мм} \left( 140 \text{ мм} - \frac{59 \text{ мм}}{2} \right) + 345 \text{ МПа} \cdot 87,38 \text{ см}^2 \frac{300 \text{ мм}}{2} = 785 \text{ кНм}.$$

$M_{\max} = 425 \text{ кНм} \leq M_u = 785 \text{ кНм}$  — условие прочности выполняется.

Проверка жесткости.

Для расчета на жесткость необходимо рассчитать геометрические характеристики приведенного сечения согласно рис. 19.

Длительный модуль деформации бетона:

$$E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}} = \frac{32,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}}{1 + 2,3} = 9848,5 \text{ МПа}.$$

Коэффициент приведения бетона к стали:

$$\alpha_b = \frac{E_s}{E_{b,\tau}} = \frac{2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}}{9848,485 \text{ МПа}} = 20,9.$$

Приведенная ширина плиты:

$$b_{b,red} = \frac{b_{eff}}{\alpha_b} = \frac{3 \text{ м}}{20,917} = 143,4 \text{ мм}.$$

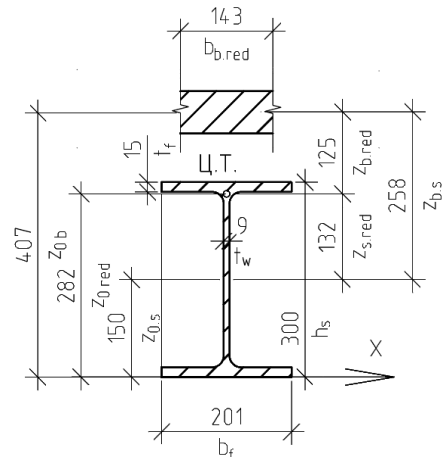


Рис. 19. Определение геометрических характеристик сечения

Приведенная площадь плиты:

$$A_{b, \text{red}} = b_{b, \text{red}} \cdot h_f = 14,34 \text{ см} \cdot 6,5 \text{ см} = 93,23 \text{ см}^2.$$

Приведенная площадь сечения:

$$A_{\text{red}} = A_{b, \text{red}} + A_s = 93,23 \text{ см}^2 + 87,38 \text{ см}^2 = 180,61 \text{ см}^2.$$

Расстояния от оХ до центра тяжести плиты:

$$z_{0, b} = h_s + h_n + \frac{h_f}{2} = 300 \text{ мм} + 75 \text{ мм} + \frac{65 \text{ мм}}{2} = 407,5 \text{ мм}.$$

Расстояния от оХ до центра тяжести стального сечения:

$$z_{0, s} = \frac{h_s}{2} = \frac{300 \text{ мм}}{2} = 150 \text{ мм}.$$

Приведенный статический момент относительно оХ:

$$\begin{aligned} S_{\text{red}} &= A_{b, \text{red}} \cdot z_{0, b} + A_s \cdot z_{0, s} = 93,23 \text{ см}^2 \cdot 40,75 \text{ см} + 87,38 \text{ см}^2 \cdot 15 \text{ см} = \\ &= 5109,7 \text{ см}^3. \end{aligned}$$

Расстояния от оХ до центра тяжести сечения:

$$z_{0, \text{red}} = \frac{S_{\text{red}}}{A_{\text{red}}} = \frac{5109,7 \text{ см}^3}{180,61 \text{ см}^2} = 282,9 \text{ мм}.$$

Расстояния от центра тяжести сечения до центра тяжести плиты:

$$z_{b, \text{red}} = z_{0, b} - z_{0, \text{red}} = 407 \text{ мм} - 282,9 \text{ мм} = 124,1 \text{ мм}.$$

Расстояния от центра тяжести сечения до центра тяжести стали:

$$z_{s, \text{red}} = z_{0, \text{red}} - z_{0, s} = 282,9 \text{ мм} - 150 \text{ мм} = 132,9 \text{ мм}.$$

Расстояния от центра тяжести стали до центра тяжести плиты:

$$z_{b,s} = \frac{h_s}{2} + h_n + \frac{h_f}{2} = \frac{300 \text{ мм}}{2} + 75 \text{ мм} + \frac{65 \text{ мм}}{2} = 257,5 \text{ мм}.$$

Приведенный момент инерции сечения:

$$I_{\text{red}} = \frac{b_{b,\text{red}} \cdot h_f^3}{12} + A_{b,\text{red}} \cdot z_{b,\text{red}}^2 + I_s + A_s \cdot z_{s,\text{red}}^2;$$

$$I_{\text{red}} = \frac{14,3 \text{ см} (6,5 \text{ см})^3}{12} + 93,23 \text{ см}^2 (12,5 \text{ см})^2 + 14\,209,66 \text{ см}^4 + 87,38 \text{ см}^2 (13,29 \text{ см})^2;$$

$$I_{\text{red}} = 44\,444,8 \text{ см}^4.$$

Согласно формуле (15), получаем следующее:

$$f_{\text{max}} = \frac{5}{384} \frac{q^n l^4}{E_s I_{\text{red}}} = \frac{5}{384} \frac{15,84 \text{ кН/м} \cdot (12 \text{ м})^4}{2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа} \cdot 44\,444,8 \text{ см}^4} = 46,7 \text{ мм},$$

откуда

$$f_{\text{max}} = 46,7 \text{ мм} \leq f_u = 48 \text{ мм} \text{ — условие жесткости выполняется.}$$

Таким образом, рис. 8 и рис. 12 позволили сразу определить подходящие характеристики сечения комбинированной балки.

#### **Заключение и обсуждение**

На основании проведенных рассуждений можно сделать следующие выводы:

1. В результате критического анализа выявлено отсутствие наглядных методов подбора комбинированной балки.
2. Сформулирован критерий эффективности комбинированной балки, зависящий от характеристик элементов сечения. Использование данного критерия при расчете на прямой поперечный изгиб показывает, насколько задействованы материалы элементов сечения.
3. Предложенная методика подбора комбинированной балки позволяет ускорить и упростить процесс проектирования перекрытия гражданского здания.

В дальнейших изысканиях необходимо рассмотреть другие типы профилированного настила и исходные данные для формирования более полного представления об особенностях подбора сечения.

Также необходимо рассмотреть балочные двутавры и профили, принимающее промежуточное положение между рассмотренными номерами.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Виноградова Н. А., Швец Г. А. Исследования сталежелезобетонных изгибаемых конструкций (обзор) // Вестн. Инженер. шк. Дальневосточ. федер. ун-та. 2020. № 1(42). С. 114—127. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-12. EDN: SFPYFY.

2. *Крючков А. А., Чернухина Е. А.* Развитие и использование сталежелезобетонных конструкций в современных зданиях // Наука и инновации в строительстве : сб. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. к 65-летию БГТУ им. В. Г. Шухова, г. Белгород, 18 апр. 2019. Белгород : Белгор. гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова, 2019. С. 77—79. EDN: OKIVET.
3. *Long C. T., Hoan P. Q., Quy D. X.* History and applications of concrete steel composite structure // Ho Chi Minh City Open University Journal of Science — Engineering and Technology. 2022. Vol. 12. No. 2. Pp. 111—120. URL: <https://doi.org/10.46223/HCMCOUJS.tech.en.12.2.2467.2022>.
4. *Кибицева Ю. А., Астафьева Н. С.* Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и строительство. 2018. № 2. С. 27—34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004.
5. *Веселов В. В.* Применение сталежелезобетонных конструкций в мостовых сооружениях // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. 2023. Т. 20. Вып. 3. С. 633—644. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-633-644.
6. *Мирсаянов И. Т., Гиматдинов И. М.* Расчет сталежелезобетонной балки на основе двухлинейной диаграммы деформирования // Изв. КГАСУ. 2024. № 3(69). С. 118—129. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.11. EDN: IPUFWM.
7. О новом Руководстве по проектированию сталежелезобетонных конструкций (в развитие СП 266.13330.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования») / С. Б. Крылов, В. А. Семенов, Д. В. Конин и др. // Academia. Архитектура и стр-во. 2019. № 1. С. 99—106. DOI: 10.22337/2077-9038-2019-1-99-106. EDN: ZBXKXJ.
8. *Тамразян А. Г., Замалиев Ф. С.* Сталежелезобетонные перекрытия, новые методы их расчета // Изв. КГАСУ. 2024. № 4(70). С. 118—130. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.11. EDN: IBALUY.
9. *Lorenz R. F.* Understanding composite beam design methods using LRFD // Eng. J. 1988. Vol. 25. No. 1. Pp. 35—38.
10. *Miller J. P.* Strengthening of existing composite beams using LRFD procedures // Eng. J. 1996. Vol. 33. No. 2. Pp. 65—72.
11. *Chattopadhyay S. N. U.* Numerical investigation of steel-concrete composite beams using flexible shear connectors // AIMS Mater. Sci. 2022. Vol. 9. No. 5. Pp. 668—683.
12. *Breda B. D., Pietralonga T. C., Alves É. C.* Optimization of the structural system with composite beam and composite slab using Genetic Algorithm // Rev. IBRACON Estrut. E Mater. 2020. Vol. 13. No. 6. DOI: 10.1590/s1983-41952020000600002.

© Голиков А. В., Гаранжа И. М., Румянцев Н. И., Федорова А. Р., 2026

Поступила в редакцию  
03.12.2025

Ссылка для цитирования:

Голиков А. В., Гаранжа И. М., Румянцев Н. И., Федорова А. Р. Методика выбора рационального сечения комбинированной балки с профилированным настилом в гражданском строительстве // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 1(102). С. 47—69. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_47.

Об авторах:

**Голиков Александр Владимирович** — канд. техн. наук, доц. каф. металлических и деревянных конструкций, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; alexandr\_golikov@mail.com

**Гаранжа Игорь Михайлович** — канд. техн. наук, доц. каф. металлических и деревянных конструкций, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; garigo@mail.ru

**Румянцев Николай Игоревич** — магистрант каф. металлических и деревянных конструкций, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; nicrumote@gmail.com

**Федорова Анна Романовна** — магистрант каф. металлических и деревянных конструкций, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; fedorovaaa2004@gmail.com

**Alexandr V. Golikov, Igor M. Garanzha, Nikolai I. Rumyantsev, Anna R. Fedorova**

**National Research Moscow State University of Civil Engineering**

## **METHODOLOGY FOR SELECTING A RATIONAL SECTION FOR A COMBINED BEAM WITH PROFILED SHEET IN CIVIL ENGINEERING**

With the development of civil construction, the issue of applying new structural forms becomes increasingly relevant. Steel-reinforced concrete structures can serve as a promising method to ensure the load-bearing capacity of a building. One of the options for steel-reinforced concrete structures used in creating floor systems is a composite beam. The essence of this beam lies in considering the joint work of the steel profile and the reinforced concrete slab, which significantly increases the strength and stiffness of the structure. Since steel-reinforced concrete structures have been relatively recently used in civil construction, there is a need for regular improvement of normative documents, and the development of proven methods for selecting and calculating composite beams, as well as ways to assess the efficiency of the adopted solutions.

The design assumptions were made in accordance with the building codes and guidelines for the design of steel-reinforced concrete structures. The source parameters were adopted from relevant building codes and GOST standards for steel I-beams, profiled sheeting, and concrete characteristics. The strength and stiffness calculations were carried out according to the limit state method. Equilibrium equations for determining the bearing capacity of the cross-section were developed based on the limit equilibrium method. The results were processed using statistical methods. The criterion for the rational cross-section of the combined beam was formulated based on the absolute difference between the maximum tensile force in the steel and the maximum compressive force in the concrete.

The maximum bending moments and axial inertia moments for the specified composite beams were determined. The criterion for the rational cross-section of the composite beam, based on the optimal use of the cross-sectional materials, is described. A methodology for selecting composite beams was developed. An example of the selection process, according to the proposed methodology, is provided.

The need to continue improving methods for calculating and selecting composite beams has been established. A criterion for the efficiency of a composite beam, depending on the characteristics of its cross-sectional elements, has been formulated. The described calculation method for the composite beam accelerates and simplifies the initial selection process of the elements included in the composite section.

**Key words:** steel-reinforced concrete structures, composite beam, limit equilibrium method, strength, rigidity.

### *For citation:*

Golikov A. V., Garanzha I. M., Rumyantsev N. I., Fedorova A. R. [Methodology for selecting a rational section for a combined beam with profiled sheet in civil engineering]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 1, pp. 47–69. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_47.

### *About authors:*

**Alexandr V. Golikov** — Candidate of Engineering Sciences, National Research Moscow State University of Civil Engineering. 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; alexandr\_golikov@mail.ru

**Igor M. Garanzha** — Candidate of Engineering Sciences, National Research Moscow State University of Civil Engineering. 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; garigo@mail.ru

**Nikolai I. Rumyantsev** — Master's Degree student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nicrumote@gmail.com

**Anna R. Fedorova** — Master's Degree student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). 26, Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; fedorovaaa2004@gmail.com