

## Оптимизация применения стальных балок в комплексных железобетонных перекрытиях

*В.С. Кузнецов, Ю. А. Шапошникова*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** В статье рассмотрены особенности работы монолитного перекрытия по профнастилу, опирающегося на стальные двутавровые балки. Изложен инженерный способ определения оптимальных сечений двутавровых стальных балок, исходя из совместности деформаций элементов перекрытия. Предложены простые расчетные формулы для предварительного установления оптимальных геометрических размеров, балок их пролетов и нагрузок. Выполнены расчеты прочности, произведены сравнение и анализ результатов численного эксперимента. Представлена таблица, в которой высчитана разрушающая погонная нагрузка для некоторых балок и пролетов, по результатам таблицы построены графические зависимости напряжений в балках как функции величин пролетов и относительных прогибов, а также напряжений, соответствующих разрушению балки. Установлены оптимальные коэффициенты использования материалов, полученные в соответствии с требованиями прочности и деформативности перекрытий. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании комбинированных балок различных сечений и пролетов.

**Ключевые слова:** двутавровая балка, комбинированная балка, коэффициент использования материала, нормативный прогиб, профилированный лист, прочность, перекрытие по профилированному настилу, сталежелезобетонное перекрытие.

Монолитные железобетонные перекрытия по металлическим балкам используется при возведении различных объектов: промышленных зданий, торговых и офисных центров, автостоянок и т.п. [1,2]. Такие перекрытия состоят из стальных балок, профилированного настила и железобетонной плиты (рис. 1).

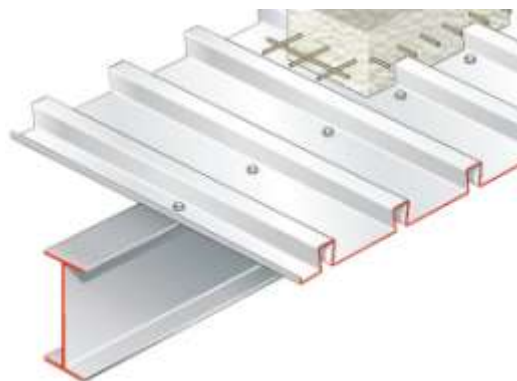


Рис. 1. - Конструкция перекрытия

Применение профилированного листа в качестве конструктивного элемента и несъемной опалубки дает возможность создания экономически выгодной и легко возводимой конструкции, что всегда актуально [3, 4]. При проектировании необходимо обеспечить прочность отдельных элементов и перекрытия в целом [5-6], а также обеспечить требования второй группы предельных состояний [7-8].

Нормальные напряжения при исчерпани несущей способности стальных балок от действия поперечной нагрузки зависят от прочности материала и равны расчетному сопротивлению применяемой стали [9-10]. Уровень этих напряжений, как правило, не совпадает с напряжениями, возникающими в балке при удовлетворении требований второй группы предельных состояний (прогибов).

Так более жесткие требования к прогибам приводят к увеличению сечения и к уменьшению коэффициента использования материала по прочности. Однако при проектировании перекрытий приоритетными являются расчеты первой группы предельных состояний, а удовлетворение требований перекрытий по перемещениям сводится к простому увеличению сечений. Таким образом, метод выбора экономически целесообразных балок, в которых, при заданных в соответствии с [10-12] перемещениях, перекрытиях, нормальные напряжения близки расчетным, является актуальным.

В качестве объекта исследования рассматривались широко используемые в комплексных перекрытиях прокатные балки 18Б1-26Б1-30Б1-35Б1-40Б1-45Б1-50Б1-55Б1-60Б1 в диапазоне расчетных пролетов 4; 6; 8 и 10 м при относительных прогибах  $(1/150-1/200-1/250-1/300)l$ ; расчетное сопротивление стали (при толщине полки менее 20 мм)  $R_y = 240 \text{ МПа} \approx 2400 \text{ кг/см}^2$ , модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ . За расчетную схему принималась шарнирно опертая, статически определимая балка, нагруженная равномерно

---

распределенной нагрузкой  $q$ , создаваемая собственным весом стальной балки, профилированным листом, железобетонной плитой и временной равномерно распределенной нагрузкой.

В соответствии с требованиями первой группы предельных состояний несущая способность стальных балок выражается формулой (1).

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq R_y, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – предельное напряжение в стальной балке;  $M$  – внешний момент;  $W$  – момент сопротивления;  $R_y$  – расчетное сопротивление материала.

Откуда максимальный изгибающий момент, воспринимаемый элементом, выражается формулой (2).

$$M = R_y W, \quad (2)$$

Зная моменты сопротивления, можно установить предельные моменты для вышеназванного ряда балок и вычислить соответствующие величины предельной равномерно распределенной нагрузки (табл. 1).

Таблица № 1

Разрушающая погонная нагрузка  $q$  (кгс/см)  
для некоторых балок и пролетов

№ проката	Момент инерции $I$	Момент сопротивления $W$	Момент по прочности $M$	Разрушающая погонная нагрузка $q$ при различных пролетах $l$ см			
				400	600	800	1000
	см <sup>4</sup>	см <sup>3</sup>	кгсм	кг/см	кг/см	кг/см	кг/см
18Б1	1063	120.1	28820	14,41	6,41	3,60	2,31
26Б1	4024	312	748800	37,44	16,64	9,36	5,99
30Б1	6328	427	1024800	51,24	22,77	12,81	8,20
35Б1	10060	581,7	1396080	69,80	31,02	17,45	11,17
40Б1	15750	803,6	1928640	96,43	42,86	24,11	15,43

---

45Б1	24940	1125,8	2701920	135,10	60,04	33,77	21,62
50Б1	37160	1511	3626400	181,32	80,59	45,33	29,01
55Б1	55680	2051	4922400	246,12	109,39	61,53	39,38
60Б1	78760	2556	6374400	318,72	141,65	79,68	51,00

В то же время конструкции должны соответствовать требованиям второй группы и, в частности, прогибам, которые зависят от изгибной жесткости элемента, расчетного пролета и приложенной нагрузки.

Для шарнирно опертой балки, загруженной равномерно распределенной нагрузкой прогиб  $f$  в соответствии с [10] может определяться по известной формуле (3).

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_n l^4}{EI}, \quad (3)$$

где  $q_n$  – нагрузка;  $l$  – пролет;  $EI$  – изгибная жесткость элемента.

Отсюда нагрузка, вызывающая заданный прогиб, находится в соответствии с выражением (4).

$$q_n = \frac{384}{5} \cdot \frac{fEI}{l^4}, \quad (4)$$

Выразив прогиб через длину пролета как  $f = l/n$ , где  $n$ -коэффициент относительного прогиба, назначаемый в соответствии с [11], окончательно получаем выражение для нагрузки, вызывающей заданное перемещение.

$$q_n = 76,8 \frac{EI}{nl^3}, \quad (5)$$

где  $q_n$  – нагрузка, вызывающая заданный прогиб;  $l$  – пролет;  $EI$  – изгибная жесткость элемента;  $n$ -коэффициент относительного прогиба.

Учитывая, что модуль упругости стали  $E$  практически постоянен для всех видов строительных сталей и равен  $2 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>, формула (5) принимает вид

$$q_n = 153,6 \frac{I \cdot 10^6}{nl^3}, \quad (6)$$

В соответствии с выражением (1), в балках различных пролетов вычислялись нормальные напряжения, соответствующие стадии разрушения элемента, а формула (6) использовалась для вычисления напряжений при достижении балкой относительного прогиба, установленного для конкретного перекрытия в соответствии с требованиями [10-12]. На рис. 1, 2 и 3 представлены графические зависимости напряжений в балках как функции величин пролетов и относительных прогибов, а также напряжений, соответствующих разрушению балки.

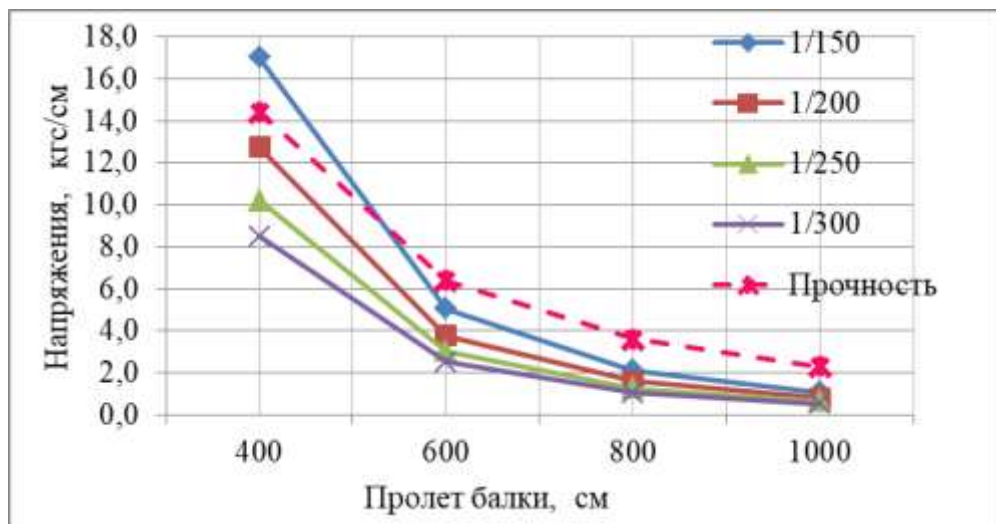


Рис. 2. - Нормальные напряжения в балке 18Б1

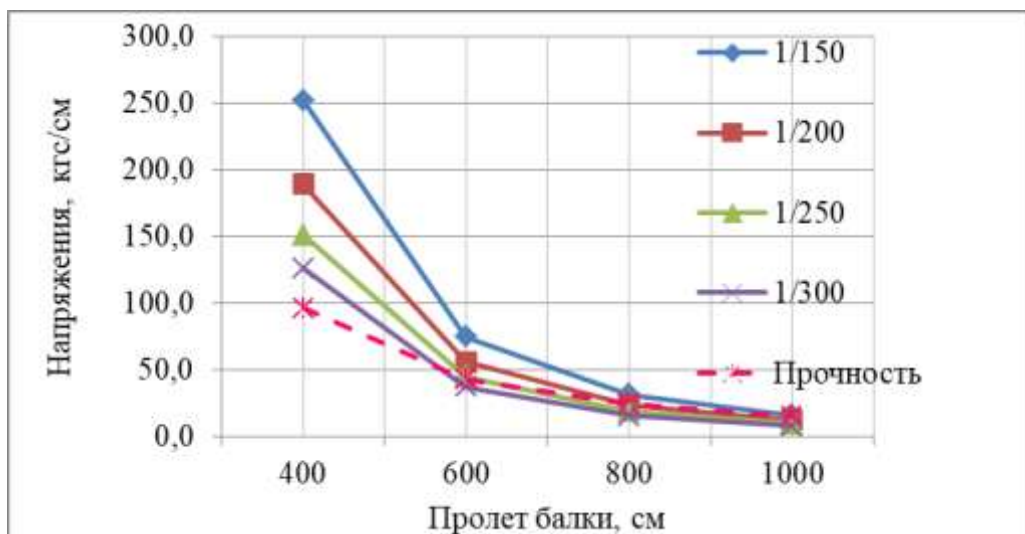


Рис. 3. - Нормальные напряжения в балке 40Б1

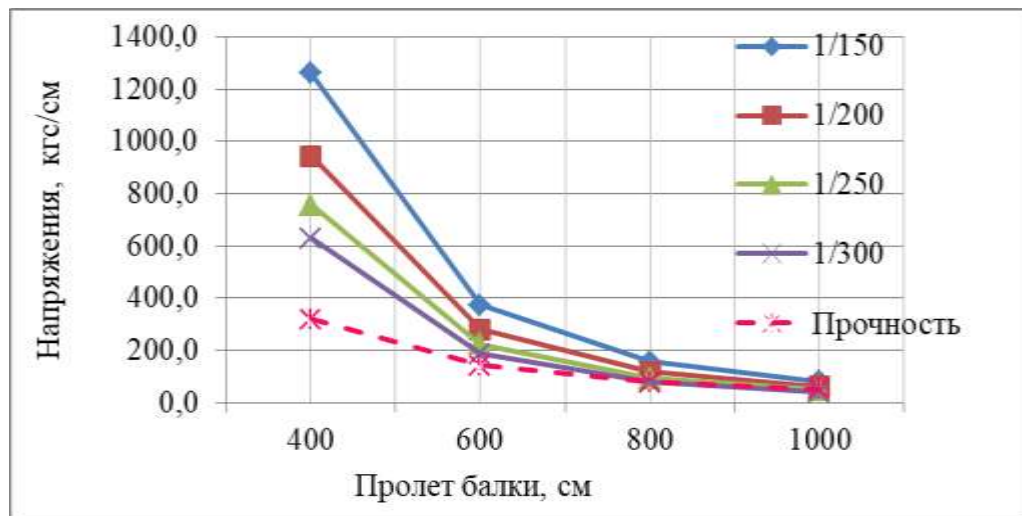


Рис. 4. - Нормальные напряжения в балке 60Б1

Анализ графиков (рис. 2) показывает, что эффективное использование прокатных балок типа 18Б1 в составе комплексных перекрытий может быть достигнуто при пролетах 4,5-5,5 метра и расчетном относительном прогибе  $f/l \approx 1/150$  ( $n=l/f=150$ ). При этих параметрах коэффициент использования материала (сталь С240) близок к единице и перемещение балки соответствует установленной для конкретной конструкции. Балки 40Б1 (рис. 3) могут эффективно использоваться при пролетах 6,0÷10 м и относительном прогибе  $f/l \approx 1/200 \div 1/300$ . Графики (рис. 4) показывают, что балки 60Б1 предпочтительнее использовать при пролетах 6,0÷10 м и относительном прогибе  $f/l \approx (1/200 \div 1/300)$ .

На рис. 5-6 представлены графики изменения коэффициентов использования материала для пяти балок при различных условиях эксплуатации перекрытий (расчетных пролетов, прогибов).

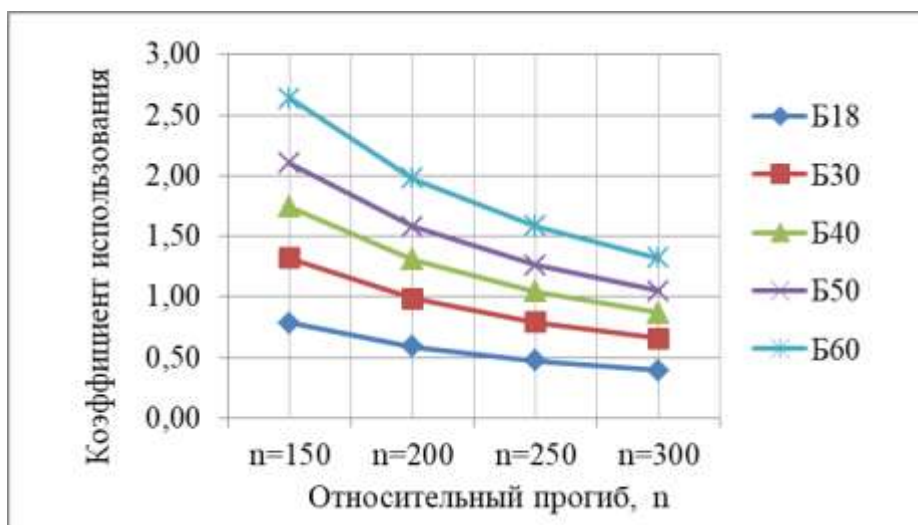


Рис. 5. - Коэффициенты использования материала балок (пролет 6 м)

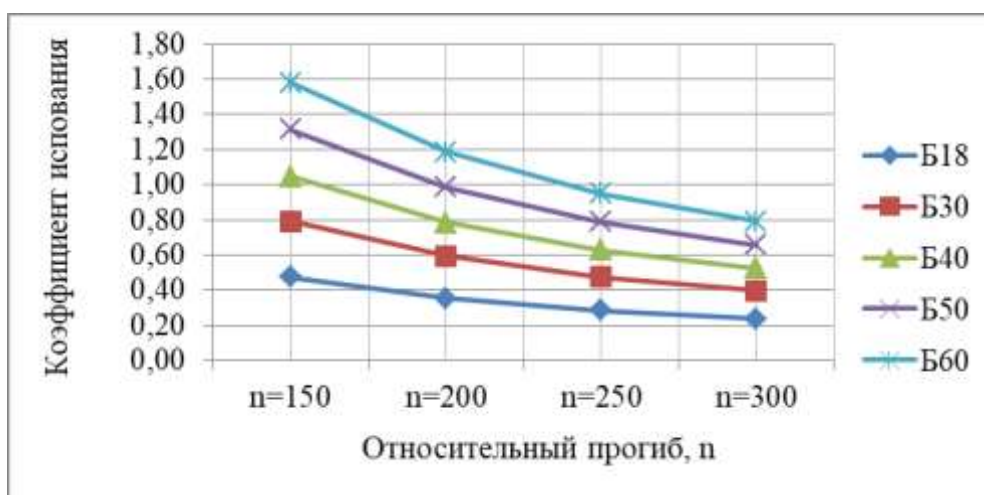


Рис. 6. - Коэффициенты использования материала балок (пролет 10 м)

Очевидно, что превышение коэффициента больше единицы недопустимо, так как приводит к исчерпанию несущей способности элемента, а значения коэффициента менее единицы приводят к недоиспользованию прочностных характеристик примененной стали. Оптимальными представляются такие конструкции, в которых коэффициент использования материала при заданном прогибе  $k_f$  равен коэффициенту использования стали по прочности  $k_s$ .

В практических расчетах, сложно добиться строгого соблюдения равенства и, как правило, коэффициент использования, принимается  $k_f \leq 0,8k_s$ . При проектировании следует принимать во внимание, что для



прочностных расчетов используются расчетные нагрузки, а для определения перемещений нормативные.

Предложенный способ определения оптимальных размеров балок и пролетов является универсальным и может быть реализован, практически для всех видов проката и размеров пролетов.

### Литература

1. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. №4. С. 205-208.

2. Егоров П.И., Королев С.А. Сталежелезобетонные перекрытия // Дальний восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2015. №1. С. 310-313.

3. Айрумян Э.Л., Каменщиков Н.И., Румянцева И.А. Особенности расчета монолитных плит сталежелезобетонных перекрытий по профилированному стальному настилу // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №9 С. 21-26.

4. Тамразян А.Г., Арутюнян С.Н. К учету профилированного настила как рабочей арматуры при расчете монолитных сталежелезобетонных плит перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №7. С. 64-68.

5. Постанен С.О., Березкина А.Ю., Комиссаров В.В., Постанен М.О. Сталежелезобетонные перекрытия по профилированному стальному настилу. // Молодой ученый. 2016. №26. С. 74-76.

6. Будошкина К.А., Кузнецов В.С., Мурлышева Ю.А., Улямаев А.С., Шапошникова Ю.А. Усиление сталежелезобетонных перекрытий предварительно напрягаемой стержневой арматурой // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4907](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4907)

---



7. Zulpuev A.M., Baktygulov K. Two-dimensional model of calculation of reinforced concrete composite beams by the method of concentrated deformations // ARPN journal of engineering and applied sciences. 2017. №4. pp. 1030-1037.

8. Будошкина К.А., Кузнецов В.С., Мурлышева Ю.А., Улямаев А.С., Шапошникова Ю.А. Анализ работы комбинированных балок в широком диапазоне нагрузок // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4925

9. Korouzhdeh T., Eskandari-Naddaf H. Cost-safety optimization of steel-concrete composite beams using standardized formulation // Engineering science and technology, an international journal. 2018. pp. 523-532.

10. СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. 2016.

11. СП 46.13330.2012 Мосты и трубы. 2013.

12. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. 2017.

### References

1. Babalich V.S., Androsov E.N. Advances in Modern Science (Rus). 2017. №4. pp. 205-208.

2. Egorov P.I., Korolev S.A. Far East: problems of the development of the architectural and construction complex (Rus). 2015. №1. pp.310-313.

3. Ayrumyan E.L., Kamenshchikov N.I., Rumyantseva I.A. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2015. №9. pp. 21-26.

4. Tamrazyan A.G., Arutyunyan S.N. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2016. №7. pp. 64-68.

5. Postanen S. O., Berezkina A. Yu., Komissarov V. V., Postanen M. O. Molodoj uchenyj. 2016. №26. pp. 74-76.

6. Budoshkina K.A., Kuznecov V.S., Murlysheva Ju.A., Uljamaev A.S., Shaposhnikova Ju.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4907

---



7. Zulpuev A.M., Baktygulov K. ARPN journal of engineering and applied sciences. 2017. №4. pp. 1030-1037.

8. Budoshkina K.A., Kuznecov V.S., Murlysheva Ju.A., Uljamaev A.S., Shaposhnikova Ju.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4925](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4925)

9. Korouzhddeh T., Eskandari-Naddaf H. Engineering science and technology, an international journal. 2018. pp. 523-532.

10. SP 266.1325800.2016 konstrukcii stalezhelezobetonnye. pravila proektirovaniya [Set of rules 266.1325800.2016 reinforced concrete structures. design rules]. 2016.

11. SP 46.13330.2012 mosty i truby [Set of rules 35.13330.2011 bridges and pipes]. 2013.

12. SP 16.13330.2017 stal'nye konstrukcii [Set of rules 16.13330.2017 steel structures]. 2017.