

УДК 624.15.001.24

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.151.2015.69134>

**ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПО РАСХОДУ СТАЛИ СЕЧЕНИЙ СВАРНЫХ  
ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК**

Д-ры техн. наук А.И. Лапенко, А.И.Голоднов, инж. И.П. Фомина

**ПІДБІР ОПТИМАЛЬНИХ ЗА ВИТРАТАМИ СТАЛІ ПЕРЕРІЗІВ ЗВАРНИХ ДВОТАВРОВИХ  
БАЛОК**

Д-ри техн. наук О.І. Лапенко, О.І. Голоднов, інж. І.П. Фоміна

**SELECTION OPTIMAL ON EXPENSE STEEL SECTIONS OF THE WELD-FABRICATED  
FLANGE BEAMS**

**Dr. professor A.I.Lapenko, A.I.Holodnov, is an engineer I.P. Fomina**

*Предложена методика подбора сечений стальных двутавровых балок. Установлены зависимости между действующими усилиями и параметрами сечения, которые отвечают условиям прочности, жесткости, общей и местной устойчивости. Компоновка сечений выполняется с использованием критерия «оптимальная прочность стали», что подразумевает удовлетворение конструкции ограничениям по первой и второй группам предельных состояний одновременно.*

**Ключевые слова:** стальная двутавровая балка, оптимальная прочность стали, компоновка сечения.

*Запропоновано методику підбору перерізів сталевих двотаврових балок. Встановлено залежності між чинними зусиллями і параметрами перерізу, які відповідають умовам міцності, жорсткості, загальної та місцевої стійкості. Компонування перерізів виконується з використанням критерію «оптимальна міцність стали», що має на увазі задоволення конструкції обмеженням за першою та другою групами граничних станів одночасно.*

**Ключові слова:** сталева двотаврова балка, оптимальна міцність сталі, компонування перерізу.

*The subjects of the article are sanctified to the decision of pressing question - optimal planning of the steel weld-fabricated beams of the different setting. Such constructions are used as elements of a transport building, ceiling and coverages of industrial and civil building etc.*

*It is set that the effective method of decline of expense of material of component sections of the weld-fabricated beams is the use became to maximal durability on condition of satisfaction to deformation limitations. Optimal durability was become for the component beams of permanent section with preset parameter of loading and deformation limitations there is an only value of calculation resistance, answering global a minimum of function of mass. In the point of global minimum satisfaction of three maximum states is provided: to durability, general and local stability, deformability. Expression for*

*optimal durability of steel always can be got both for the separate loading and for their calculation combinations, without depending on the applied criterion of optimization of calculation resistance.*

*Methodology of selection of sections of steel flange beams is offered. Arrangement of sections is executed with the use of criterion «optimal durability became», that implied satisfaction of construction to limitations on the first and second to the groups of the maximum states simultaneously.*

**Keywords:** steel flange beam, optimal durability steel, arrangement of section.

**Введение.** Предложения, изложенные в настоящей статье, разработаны в соответствии с рекомендациями действующих нормативных документов [3, 4] и распространяются на расчет и проектирование изгибаемых элементов составного двутаврового сечения различного назначения. Проектируемые конструкции могут быть элементами транспортных сооружений, перекрытий и покрытий гражданских и промышленных зданий и сооружений и т.д., которые работают в условиях ограниченной динамики и нормальных температур. Компонировка сечений выполняется с использованием критерия «оптимальная прочность стали», что подразумевает удовлетворение конструкции ограничениям по первой и второй группам предельных состояний одновременно. В связи с этим тематика статьи может рассматриваться как актуальная и практически полезная.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями.** Обычно проектирование элементов ведется на основе общих принципов компоновки сечения. Суть методов компоновки составных сечений сводится к установлению зависимостей между действующими усилиями и параметрами сечения, отвечающих условиям прочности, жесткости, общей и местной устойчивости. Эти зависимости находятся аналитически или численно.

Как известно, предельным состоянием считается такое состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Критерием предельного состояния является признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, которые устанавливаются нормативно-

технической и (или) проектной документацией. При этом в зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросы, связанные с изучением различных аспектов проектирования стальных балок и оптимального проектирования стальных конструкций вообще, в той или иной мере рассматривались в работах А.А. Акимова, Е.И. Белени, В.В. Бирюлева, Е.И. Вайншейна, В.М. Вахуркина, А.В. Геммерлинга, А.И. Голоднова, Я.А. Каплуна, В.А. Кравчука, Н.П. Мельникова, И.И. Набокова, В.А. Пермькова, В.В. Трофимовича, В.Н. Шимановского и многих других исследователей. В их работах изложены основные принципы и методы оптимизации сечений двутавровых элементов, в т.ч. и с использованием предварительного напряжения, однако вопрос этот вряд ли можно считать окончательно решенным. Проектирование конструкций с использованием критерия оптимальная прочность стали рассматривалось в работах А.И. Голоднова, И.И. Набокова, Л.Н. Филатовой, И.П. Фоминой [1, 2, 3, и др.] и др. Предложения, изложенные в настоящей статье, развивают известные положения по проектированию конструкций минимальной массы и дополняют их в части учета упругопластических свойств стали в конструкциях при проектировании комбинированных (сталежелезобетонных) конструкций.

**Цель и задачи исследования.** Цель – разработка методики подбора сечений сварных двутавровых балок с использованием понятия «оптимальная прочность стали» для проектирования конструкций различного назначения и типов, в т.ч. и комбинированного.

**Задачи исследования:**

- изучить закономерности деформирования и усовершенствовать методы расчета стальных балок составного сечения с учетом влияния различных факторов;

- усовершенствовать методику определения рациональных параметров при компоновке составных двутавровых сечений сварных стальных балок составного сечения.

**Основная часть.** Известно, что действующая в настоящее время методика проектирования сварных двутавровых балок была предложена Н.С. Стрелецким [2]. Методика расчёта оперировала понятиями оптимальной и минимальной высоты сечения и не давала однозначного результата, минимизированного по массе.

Понятие оптимальной высоты составного двутаврового сечения балки, зависящей от соотношения параметров стенки  $h_w/t_w$ , было предложено В.М. Вахуркиным [3, стр. 4]. Такой подход сохранился в неизменном виде и до сих пор. Во всех «классических» учебниках по металлическим конструкциям утверждается, что реальная высота сечения составной балки должна быть  $h_{\min} \leq h \leq h_{\text{opt}}$ . Действительно, решением двумерной задачи при фиксированной прочности стали, является минимум функции площади расчётного сечения в виде производной  $dA/dh = 0$ .

Функция массы при фиксированной прочности стали представляет собой плоскую кривую, на которой отыскивается точка минимума. Считается, что каждой величине прочности стали соответствует своя повторяющаяся плоская кривая функции массы, имеющая свой минимум, определяемый по В.М. Вахуркину. Это кажется очевидным и признается всеми.

При этом не стоит думать, что в хорошо запроектированной балке все расчётные проверки должны выполняться на пределе. Это требование обязательно только для проверки по нормальным напряжениям, которую следует считать важнейшей проверкой, где не допускается выполнение условия  $\sigma > R_y$

(перенапряжения), а недонапряжения не должны быть более 5%. С другой стороны, для балок, сечение которых подобрано по жёсткости, недонапряжения неизбежны. При остальных проверках запасы могут быть любыми, если это обосновано конструктивными соображениями и не ведёт к существенному утяжелению конструкции [1, 2, 3].

Понятие оптимальной высоты составного расчётного двутаврового сечения получено в двумерном представлении графика изменения функции массы, в котором по вертикали откладывается площадь, а по горизонтали высота сечения.

Анализ выполненных ранее работ позволил обобщить рекомендации по компоновке оптимальных двутавровых сечений, которые являются объектом исследований. Так, минимальный расход стали, вне зависимости от напряженного состояния элемента, достигается при компоновке сечения из листов, для которых условия местной устойчивости выполняются на пределе. Иными словами, определением степени влияния напряженного состояния на параметры компоновки не занимался практически никто, хотя косвенно эти вопросы затрагивались, например, в исследованиях [4]. Эти исследования проводились в Челябинском политехническом институте и на Челябинском заводе металлоконструкций. В этой работе были рассмотрены закономерности падения растягивающих напряжений от краев стенки к ее середине, что было объяснено суммированием нормальных реактивных напряжений от сварки с нормальными напряжениям от предварительного растяжения стенки. При этом авторы понимали, что процесс формирования внутренних напряжений в двутавровых балках нельзя сводить к алгебраической сумме напряжений от сварки и удлинения стенки, поскольку имеет место не только начальные несовершенства тонкой стенки, но и выгиб ее из плоскости из-за неравномерного по ширине нагрева и сдерживающего влияния прилегающих холодных участков.

Анализ существующей проектной практики показал, что удельное влияние

перечисленных выше факторов на сокращение расхода металла характеризуется следующими цифрами [2]:

- применение стали повышенной и высокой прочности – 57%;
- применение экономичных профилей – 19%;
- совершенствование конструктивной формы – 16%;
- использование типовых конструкций – 2%;
- применение ЭВМ и точных методов расчёта – 6%.

Из вышеприведенного следует, что основным и наиболее эффективным способом снижения металлоёмкости составных сечений сварных балок является использование сталей максимальной прочности при условии не противоречия деформационным ограничениям (снижение общей деформативности может быть достигнуто за счет предварительного напряжения). Из этого также следует, что остальные способы снижения металлоёмкости могут быть вспомогательными, дополняющими основной.

Таким образом, необходимая оптимизация составных сечений сварных двутавровых балок по прочности является наиболее эффективным резервом снижения металлоёмкости составных балок. Вопрос оптимизации двутавровых сечений сварных балок по прочности стали в настоящее время строгого решения не имеет.

Для балок постоянного сечения формула для вычисления оптимальной прочности стали получается из выражения для определения

требуемой площади расчётного сечения [1, 2, стр. 84]:

$$A = \frac{2 \cdot h^2 \cdot \sqrt{R_y}}{3 \cdot \bar{\lambda}_w \cdot \sqrt{E}} + \frac{2 \cdot M}{h \cdot \gamma_c \cdot R_y}. \quad (1)$$

Сюда подставляется выражение для высоты сечения стенки  $h = h_{\min}$  для конкретных параметров загрузки и выражение для максимального изгибающего момента  $M$ , действующего в расчётном сечении. Выражения отвечают конкретной схеме загрузки или их расчётной комбинации. После подстановок берётся производная от функции площади расчётного сечения по прочности, и приравняется к нулю, откуда получают выражение для определения оптимальной прочности стали для отдельного загрузки или для расчётной комбинации нагрузок, используя принцип наложения.

Применяя к выражению (1) аналитический критерий минимизации функции массы  $dA/dH = 0$ , легко получить известную формулу

В.М. Вахуркина.

Компоновка сечений изгибаемых элементов начинается с определения оптимальной прочности стали. Величину оптимальной прочности стали для разных случаев загрузки можно определить по следующим формулам:

- при загрузке равномерно-распределенной нагрузкой [2]

$$R_{y,opt} = 1,96 \cdot \sqrt[9]{\frac{\gamma_f^6 \cdot q^2 \cdot E^7 \cdot \bar{\lambda}_w^2}{L^2 \cdot (L/[f])^6}}; \quad (2)$$

- при загрузке силой посередине

$$R_{y,opt} = 2,66 \cdot \sqrt[9]{\frac{\gamma_f^6 \cdot E^7 \cdot (\bar{\lambda}_w^2 \cdot P)^2}{[(3 \cdot L^2 - 4 \cdot b^2) \cdot b]^{4/3} \cdot (L/[f])^6}}; \quad (3)$$

$$\lambda_w = \frac{h_{ef}}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}}. \quad (4)$$

пролет балки;  $b$  – расстояние от крайней правой опоры до силы в пролете;  $[f]$  – допускаемый прогиб, который определяется в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [5, 6, 7 и др.];  $\lambda_w$  –

В формулах (1), (2), (3) и (4):  $\gamma_t$  – коэффициент надежности по нагрузке;  $L$  –

условная гибкость стенки;  $\bar{\lambda}_w$  — максимальное значение условной гибкости стенки, при котором устойчивость стенок балок не требуется проверять [1];  $q$  — величина равномерно-распределенной нагрузки на балку в пролете;  $P$  — величина сосредоточенной силы в пролете;  $h_{ef}$ ,  $t_w$  — соответственно, высота и толщина стенки. Рекомендуются единицы измерения — кг и см.

Численные исследования характера изменения функции массы позволили построить обобщенный график изменения функции массы, несколько противоречащий установившемуся мнению. Удивительная повторяемость графиков, построенных для различных параметров загрузки, свидетельствует о закономерности общего характера.

Известно, что уравнение упругой линии для балок с любыми параметрами загрузки, получается интегрированием дифференциального уравнения изгиба и потому всегда дифференцируемо. Указанное обстоятельство позволило сформулировать понятие оптимальной прочности стали в следующем виде: «Оптимальной прочностью стали для составных балок постоянного сечения с заданными параметрами загрузки и деформационными ограничениями, является единственное значение расчетного сопротивления, отвечающее глобальному минимуму функции массы. В точке глобального минимума обеспечено удовлетворение трех предельных состояний прочности, местной устойчивости и деформативности, осуществляемое одновременно и в верхних

пределах. Выражение для оптимальной прочности стали, всегда может быть получено как для отдельных загрузок, так и для их расчетных комбинаций, независимо от применяемого критерия оптимизации расчетного сопротивления».

При проектировании балок, осуществляемом в окрестности глобального минимума функции массы, важно уметь получать самостоятельно выражения для оптимальной прочности стали как для отдельных загрузок, так и для их расчетных комбинаций.

Таким образом, сформулировано понятие глобального минимума функции массы сварных балок постоянного сечения и показана методика вывода формул для вычисления оптимальной прочности стали как для отдельных загрузок, так и их расчетных комбинаций. Эти предложения не противоречат традиционным представлениям и дополняют их в части введения новых понятий, позволяющих выполнить оптимизацию параметров сечений.

**Выводы.** По результатам проведенных исследований сделаны выводы.

1. Оптимальным сечением для стальных двутавровых балок будет сечение, которое будет удовлетворять ограничениям по первой и второй группам предельных состояний одновременно.

2. Компоновка оптимального сечения стальной двутавровой балки возможна с использованием критерия «оптимальная прочность стали».

### Список использованных источников

1. Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. — К.: Изд-во «Сталь», 2008. — 150 с.
2. Набоков И.И. Расчет и особенности конструирования стволы двутавровых балок составного сечения с максимальными габаритами, осуществляемый в окрестности глобального минимума функции массы / И.И. Набоков, Е.П. Лукьяненко // Современ. проблемы стр-ва: Ежегод. науч.-техн. сб. / Донецкий ПромстройНИИпроект. — Донецк: ООО «Лебедь», 2001. — С. 80-86.
3. Вахуркин В.М. Наивыгоднейшая форма двутавровых балок // Бюллетень строительной техники. — 1949. — № 21. — С. 3-8.

4. Вайнштейн Е.И. Предварительно напряженные бестросовые балки с верхним поясом-распоркой / Е.И. Вайнштейн, И.Б. Козьмин, М.А. Мартенс // Исследования по строительной механике и строительным конструкциям: Темат. сб. науч. тр. / ЧПИ им. Ленинского комсомола. – Челябинск, 1985. – С. 56–60.

5. Мости та труби. Правила проектування : ДБН В.2.3-14:2006. – Офіц. вид. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с. – (Споруди транспорту. Державні будівельні норми).

6. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу: ДБН В.2.6-163:2010. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с. – (Конструкції будівель і споруд. Державні будівельні норми України)

7. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування: ДСТУ Б В.1.2-3:2006. – Введено вперше (із скасуванням в Україні розділу 10 СНиП 2.01.07-85); Введ. 01.01.2007. – К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с.

---

Лапенко Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий строительства Национального авиационного университета Тел.: (044)-406-71-60. E-mail: [my-partner@ukr.net](mailto:my-partner@ukr.net).

Голоднов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, ученый секретарь Общества с ограниченной ответственностью «Украинский институт стальных конструкций им. В.Н. Шимановского (ООО «Укринсталькон им. В.Н. Шимановского). Тел.: (044)-543-98-46. E-mail: [golodnow@ukr.net](mailto:golodnow@ukr.net).

Фомина Инна Петровна, аспирант кафедры компьютерных технологий строительства Национального авиационного университета Тел.: (044)-406-74-24.

E-mail: [olimppzb@ukr.net](mailto:olimppzb@ukr.net).

Lapenko Alexandr, doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computer Technologies in Construction Department, National Aviation University.

Holodnov Oleksandr, doctor of Technical Sciences, Scientific Secretary Company limited liability the Ukrainian Institute of Steel Constructions V. Shimanovsky (LTD V. Shimanovsky Ukrsteelconstruction).

Fomina Inna, post graduate student, Department of Computer Technologies in Construction, National Aviation University.