

УДК 624.015.5

**ОПТИМАЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА РАСЧЕТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
СТАЛИ СОСТАВНЫХ СВАРНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК**

**ОПТИМАЛЬНА ВЕЛИЧИНА РОЗРАХУНКОВОГО ОПОРУ СТАЛІ
СКЛАДЕНИХ ЗВАРНИХ ДВОТАВРОВИХ БАЛОК**

**OPTIMAL SIZE OF CALCULATION RESISTANCE BECAME THE
COMPONENT WELD-FABRICATED FLANGE BEAMS**

Голоднов А.И., д.т.н., проф., Филатова Л.Н., Фомина И.П. (Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Луганской обл.)

Голоднов О.І., д.т.н., проф., Філатова Л.М., Фоміна І.П. (Донбасский державний технічний університет, м. Алчевськ, Луганської обл.)

Golodnov A.I. doctor of technical sciences, professor, Filatova L.N., Fomina I.P. (Donbass State Technical University)

Изложены методические подходы к проектированию стальных двутавровых балок с использованием понятия оптимальной прочности стали. Применение такого понятия позволяет проектировать балки, которые одновременно на пределе удовлетворяют ограничениям по первой и второй группам предельных состояний.

Викладено методичні підходи до проектування сталевих двотаврових балок з використанням поняття оптимальної міцності стали. Застосування такого поняття дозволяє проектувати балки, які одночасно на межі задовольняють обмеженням по першій і другій групах граничних станів.

The methodical going is expounded near planning of steel j-beams with the use of concept of optimum durability became. Application of such concept allows to design beams which simultaneously on a limit satisfy limitations on the first and second groups of the maximum states.

Ключевые слова:

Стальные балки, оптимальная прочность, предельные состояния.

Сталеві балки, оптимальна міцність, граничні стани.

Steel j-beams, optimum durability, maximum states.

Состояние вопроса и задачи исследования. Известно, что действующая в настоящее время методика проектирования сварных двутавровых балок была

предложена Н.С.Стрелецким [1]. 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 [2]. 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 $dA/dh = 0$. Это и было решением В.М. Вахуркина [2].

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 [2]. 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].

Цель работы – разработка методики расчета стальных двутавровых балок составного сечения с использованием понятия оптимальной прочности стали.

Основная часть. 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.

Дальнейшее развитие вопроса аналитической оптимизации составных сечений стальных балок, начатого В.М. Вахуркиным ещё в середине XX века, выполняется и в настоящее время. Как известно, нормы СССР и Украины рекомендуют для конструкций более 40 марок стали, которые имеют 21 значение расчетного сопротивления R_y , от 230 до 590 МПа. В зарубежных же нормах рекомендуется значительно меньшее количество марок стали: во Франции и ФРГ – 3 (235–360 МПа); Канаде, Бельгии, Японии – 8 (230–700 МПа); в США – 14 (235–690 МПа). Это позволяет сделать вывод о целесообразности сокращения количества марок стали, рекомендуемых в

СССР для строительных конструкций. В то же время анализ существующей проектной практики показал, что удельное влияние перечисленных выше факторов на сокращение расхода металла характеризуется следующими цифрами [1]:

- 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 стали максимальной прочности при условии не противоречия деформационным ограничениям (снижение общей деформативности может быть достигнуто за счет выгиба или предварительного напряжения). Из этого также следует, что остальные способы снижения металлоёмкости могут быть вспомогательными, дополняющими основную.

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 строгого решения не имеет.

С использованием геометрических характеристик, представленных в упрощённой форме [3, 4, 5], были проведены численные исследования. Изучался характер изменения функции площади расчётного сечения, высоты балок, весовых характеристик и коэффициента компоновки для сварных балок постоянного сечения, имеющих соотношения параметров, определяемых по формулам:

$$t_{f,\min} = \sqrt{\frac{A_f}{E}} \sqrt{R_y}; \quad (1)$$

$$t_{w,\min} = \frac{h\sqrt{R_y}}{[\lambda_w]\sqrt{E}}. \quad (2)$$

Значению $R/R_{opt}=1$ соответствует оптимальная прочность, определяемая по критерию равенства оптимальной и минимальной высоты сечения. В точке минимума невозможно выделить доминантную высоту сечения по

причине равенства $h_{\min} = h_{opt}$. В целом из всего вышеизложенного следует вывод, что для стальных балок точка минимума функции массы, определяемая по В.М. Вахуркину, совпадает с точкой глобального минимума, определяемого оптимальной прочностью стали. Принятие $h_{\min} = h_{opt}$ для случая загрузки равномерно-распределенной нагрузкой приводит к следующему выражению:

$$R_{y,opt} = 1,96 \cdot \sqrt[9]{\frac{\gamma_f^6 \cdot q^2 \cdot E^7 \cdot \bar{\lambda}_w^2}{\gamma_c^8 \cdot L^2 \cdot (L/[f])^6}} \quad (3)$$

При загрузении силой в пролете:

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

Численные исследования характера изменения функции массы позволили построить обобщённый график изменения функции массы, несколько противоречащий установившемуся мнению. Удивительная повторяемость графиков, построенных для различных параметров загрузки, свидетельствует о закономерностях 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 расчётного сопротивления, отвечающее глобальному минимуму функции массы. В точке глобального минимума обеспечено удовлетворение трёх 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 загрузений, так и для их расчётных комбинаций, независимо от критерия оптимизации расчётного сопротивления».

При проектировании балок, осуществляемом в окрестности глобального минимума функции массы, важно уметь получать самостоятельно выражения, определяющие оптимальную прочность стали для отдельных загрузений и для их расчётных комбинаций.

Для балок постоянного сечения формула, которая определяет оптимальную прочность стали, получается из выражения определяющего требуемую площадь расчётного сечения:

$$A = \frac{2 \cdot h^2 \cdot \sqrt{R_y}}{3 \cdot \bar{\lambda}_w \cdot \sqrt{E}} + \frac{2 \cdot M}{h \cdot \gamma_c \cdot R_y}. \quad (5)$$

Сюда подставляется выражение для высоты сечения стенки $h = h_{\min}$, определяемое 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 определяющее оптимальную прочность стали для отдельного нагружения, или для расчётной комбинации нагрузок, используя принцип наложения.

Таким образом, предлагаемый подход дополняет решение В.М. Вахуркина понятием глобального минимума площади расчётного сечения.

Определив оптимальную прочность и назначив соответствующую марку стали для конструкции, компоуется сечение балки с оптимальными габаритами, получая эффективное сечение сварной балки минимальной массы, отвечающее глобальному минимуму функции массы.

Были подвергнуты анализу соотношения толщины поясов и стенки сечений сварных балок, проектируемых однозначно с максимальными габаритами. То обстоятельство, что расчётное сечение образовано листами минимальной толщины, позволяет обходиться без разделки кромок под сварку. Минимальная толщина листов допускает в большинстве случаев использовать плазменную резку, позволяющую избежать острожки кромок. Это ускоряет процесс изготовления балок, снижая его трудоёмкость, энергоёмкость и себестоимость. В конечном счёте, это позволит назначать привлекательные цены для продукции, обеспечивая ей повышенную конкурентоспособность.

Последующие вычисления с целью подбора сечений выполняются с помощью коэффициента компоновки сечений и ограничений (1), (2) по известным методикам [3, 4, 5]. Применение критерия оптимальной прочности стали позволяет проектировать как обычные, так и предварительно напряженные балки. Влияние остаточных напряжений, обусловленных сваркой поясных швов, может быть учтено с помощью предложений А.И. Голоднова [5].

Таким образом, сформулировано понятие глобального минимума функции массы сварных балок постоянного сечения и показана методика вывода формул, определяющих оптимальную прочность стали для отдельных загружений и их расчётных комбинаций. Эти предложения не противоречат традиционным представлениям и дополняют их в части введения новых понятий, позволяющих выполнить оптимизацию параметров сечений.

Выводы.

1. Предложена методика определения оптимального расчетного сопротивления стали для стальных балок. Методика базируется на использовании предпосылки о равенстве оптимальной и минимальной высоты сечения. Принятие такого допущения позволяет получить формулы для различных случаев загрузки балок.

2. Применение такого подхода к проектированию стальных балок позволяет, учитывая наличие расширенной градации в нормах СССР и Украины прочностных характеристик сталей, проектировать конструкции, параметры которых заведомо удовлетворяют ограничениям по первой и второй группам предельных состояний.

3. Использование понятия оптимальной прочности стали позволяет проектировать как обычные, так и предварительно напряженные балки. Влияние остаточных напряжений, обусловленных сваркой поясных швов и регулированием остаточного напряженного состояния, может быть учтено с помощью предложений А.И. Голоднова [5].

1. Набоков И.И. Расчёт и особенности конструирования стволов двутавровых балок составного сечения с максимальными габаритами, осуществляемый в окрестности глобального минимума функции массы / И.И. Набоков, Е.П. Лукьяненко // *Соврем. проблемы стр-ва: Ежегод. науч.-техн. сб. / Донецкий ПромстройНИИпроект.* – Донецк: ООО «Лебедь», 2001. – С. 80–86. 2. Вахуркин В.М. Наивыгоднейшая форма двутавровых балок // *Бюллетень строительной техники.* – 1949. – № 21. – С.3–8. 3. Набоков И.И. Методические рекомендации по применению облегченных предварительно-напряженных сварных двутавров для реконструкции промышленных предприятий / И.И.Набоков, А.И. Голоднов, Е.П. Лукьяненко и др. / НИИСП Госстроя УССР. – К.: НИИСП, 1988. – 45с. 4. Голоднов А.И. Принципы компоновки составных двутавровых сечений изгибаемых элементов из сталей различных марок / А.И. Голоднов, Л.Н.Филатова, И.И. Набоков // *Соврем. проблемы стр-ва: Ежегод. науч.-техн. сб. / Донецкий ПромстройНИИпроект.* – Донецк: ООО «Лебедь», 2001. – С. 234–239. 5. Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. – К.: Вид-во «Сталь», 2008. – 150 с.