

УДК 624.015.5

Понятие оптимальной величины расчетного сопротивления стали составных сварных двутавровых балок

Филатова Л. Н.

Донбасский государственный технический университет, Украина

Аннотация. 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.

Анотація. Викладено методичні підходи до проектування сталевих двотаврових балок із використанням поняття оптимальної міцності сталі. Застосування такого поняття дозволяє проектувати балки, які одночасно на межі задовольняють обмеженням за першою і другою групами граничних станів.

Abstract. The methodical approach is expounded to planning of steel flange beams with the use of the concept of a steel optimum durability. Application of such concept allows to design beams which simultaneously being on a limit state satisfy limitations on the first and second groups of the maximum states.

Ключевые слова. Стальные двутавровые балки, оптимальная прочность, предельные состояния.

Введение. Постановка проблемы. Известно, что действующая в настоящее время методика проектирования сварных двутавровых балок была предложена Н. С. Стрелецким [1]. Методика расчета 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 расчетного 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 расчетные 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 жесткости, недонапряжения неизбежны. При остальных проверках запасы могут быть любыми, если это обосновано конструктивными соображениями и не ведет к существенному утяжелению конструкции [1].

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

Основная часть. Понятие оптимальной высоты составного расчетного 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 еще в середине XX века, выполняется и в настоящее время. Как известно, нормы СССР и Украины [3] рекомендуют для конструкций 42 марки стали, имеющие 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 расчета – 6%.

Из вышеприведенного следует, что основным и наиболее эффективным способом снижения металлоемкости составных сечений сварных балок является использование стали максимальной прочности при условии непротиворечия деформационным ограничениям (снижение общей деформативности может быть достигнуто за счет выгиба или предварительного напряжения). Из этого также следует, что остальные способы снижения металлоемкости могут быть вспомогательными, дополняющими основную.

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

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

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

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

На рис. 1 приведены графики изменения относительных величин массы, оптимальной высоты стенки по В. М. Вахуркину [2], минимальной высоты стенки и коэффициента компоновки расчетного сечения постоянного сечения. Все графики представлены в относительном (безразмерном) виде, позволившем совместить их в одной координатной сетке, и построены по результатам проведенных численных исследований.

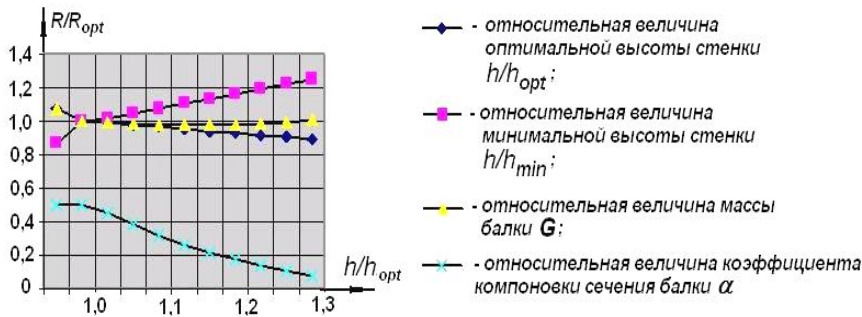


Рис. 1. Графіки змінення відносних величин маси, оптимальної висоти стінки по В. М. Вахуркіну, мінімальної висоти стінки і коефіцієнта компоновки розрахункового сечення постійного сечення

Як видно з цього малюнка, точка мінімуму маси на графіку практично збігається з одиницею. На одній вертикалі з цією точкою знаходиться точка перетину графіків змінення оптимальної і мінімальної висоти сечення.

Значенню $R/R_{opt}=1$ відповідає оптимальна міцність, визначається за критерієм рівності оптимальної і мінімальної висоти сечення. В точці мінімуму неможливо виділити домінуючу висоту сечення за причиною рівності $h_{min}=h_{opt}$. В цілому, з усього вищеописаного випливає висновок, що для сталевих балок точка мінімуму функції маси, визначається за В. М. Вахуркіну, збігається з точкою глобального мінімуму, визначеного оптимальною міцністю сталі. Прийняття $h_{min}=h_{opt}$ для випадку завантаження рівномірно-розподіленої навантаження приводить до наступного вираження:

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

При завантаженні силою в прольоті:

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

Численні дослідження характеру змінення функції маси дозволили побудувати узагальнений графік змінення функції маси, декілька суперечливих встановившися думці. Дивовижна повторюваність графіків, побудованих для різних параметрів завантаження, свідчить про закономірності загального характеру.

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, определяющие оптимальную прочность стали для отдельных загрузок и для их расчетных комбинаций.

Для балок постоянного сечения формула, которая определяет оптимальную прочность стали, получается из выражения, определяющего требуемую площадь расчетного 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 расчетном сечении. Выражения отвечают конкретной схеме загрузки или их расчетной комбинации. После подстановок берется производная от функции площади расчетного сечения по прочности и приравнивается к нулю, откуда получают выражение, определяющее оптимальную прочность стали для отдельного загрузки или для расчетной комбинации нагрузок, используя принцип наложения.

Применяя к выражению (5) аналитический критерий минимизации функции массы $dA/dH=0$, легко получить известную формулу В. М. Вахуркина.

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

На основе определения оптимальной прочности и назначения соответствующей марки стали для конструкции компонуется сечение балки с оптимальными габаритами, в результате чего получается 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. Удалось доказать, что во всех без исключения случаях соотношения толщины стенки и поясов, имеющих минимальную толщину и гибкость, близкую к заданной предельной, всегда находятся в пределах свариваемости автоматической сваркой. То обстоятельство, что расчетное сечение образовано листами минимальной толщины, позволяет обходиться без разделки кромок под сварку. Минимальная толщина листов допускает в большинстве случаев использование плазменной резки, позволяющей избежать острожки кромок. Это ускоряет процесс изготовления балок, снижая его трудоемкость, энергоемкость и себестоимость. В конечном счете, 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 [6].

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 расчетных комбинаций. Эти предложения не противоречат традиционным представлениям и дополняют их в части введения новых понятий, позволяющих выполнить оптимизацию параметров сечений.

Выводы. 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.

Применение такого подхода к проектированию стальных балок позволяет, учитывая наличие расширенной градации в нормах СССР и Украины [3]

прочностных характеристик сталей, проектировать конструкции, параметры которых заведомо удовлетворяют ограничениям по первой и второй группам предельных состояний.

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 [6].

Литература

- [1] Набоков И. И. Расчет и особенности конструирования стволів 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 : Лебедь, 2001. – С. 80–86.*
- [2] Вахуркин В. М. Наивыгоднейшая форма двутавровых балок / В. М. Вахуркин // *Бюллетень строительной техники. – 1949. – № 21. – С. 3–8.*
- [3] *Стальные конструкции : СНиП II-23-81* / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.*
- [4] 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. – 45 с.
- [5] 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 : Лебедь, 2001. – С. 234–239.*
- [6] Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А. И. Голоднов. – К. : Вид-во «Сталь», 2008. – 150 с.

Надійшла до редколегії 15.06.2011 р.