



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОПУСКОВ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ СТАЛЬНЫХ ПРОГОНОВ НА УРОВЕНЬ НАДЕЖНОСТИ

В статье представлен подход к влиянию допусков размеров поперечных сечений стальных прогонов на уровень надежности. Для оценки уровня надежности необходимо использовать методы теории вероятностей и математической статистики. Важно учитывать не только средние значения параметров, но и их разброс, который характеризуется стандартным отклонением. Один из подходов заключается в использовании метода Монте-Карло для моделирования случайных вариаций геометрических характеристик элементов конструкции. На основе полученных данных можно оценить вероятность выхода за пределы допустимых значений и определить уровень риска отказа конструкции. В отличие от метода предельных состояний, на основе разработанных алгоритмов можно выполнить оптимизацию сечения стального элемента из условия эффективного соотношения критерия безопасности и металлоемкости конструкции.

Надежность, вероятностное проектирование, стальная балка, вероятность отказа, изгиб, предельное состояние, неопределенность.

Строительное производство обусловлено разбросом размеров поперечных сечений элементов при их изготовлении. Важной задачей для оценки надежности зданий и сооружений является эффективное моделирование допусков по отклонениям в размерах поперечных сечений. Актуальность исследования влияния допусков размеров поперечных сечений стальных прогонов на уровень надежности обусловлена необходимостью обеспечения долговечности и безопасности строительных конструкций. В современных условиях проектирования и эксплуатации инженерных сооружений возрастает роль точности соблюдения технологических параметров, таких как размеры поперечного сечения элементов конструкций. Отклонения от проектных значений могут существенно повлиять на несущую способность и долговечность изделий, что делает необходимым проведение детального анализа влияния допусков на эксплуатационные характеристики стальных прогонов.

Даулетбаев Р.Б., Вовк Б.В. в своей работе [3] приводят пути получения равнонадежных конструкций при их проектировании, а также как обеспечивается надежность в процессе эксплуатации.

Д.С. Крупнина в работе [2] отмечает, важность темы надежности и безопасности зданий и сооружений на стадии их проектирования. В книге рассматриваются различные аспекты надежности строительных конструкций: методы оценки надежности; анализ факторов, влияющих на надежность (материалы, нагрузки, условия эксплуатации); проектирование с учетом требований по надежности; современные подходы к расчету и моделированию строительных конструкций.

А.Г. Тамразян в работе [4] пишет об анализе расчета конструкций по заданной надежности и это показывает, что изменчивость несущей способности влияет на относительные размеры поперечного размера сильнее, чем изменчивость нагрузок.

З.В. Беляева, С.В. Кудрявцев в работе [5] приводят основные положения по сбору нагрузок на эле-

менты конструкций, по расчету изгибаемых, сжатых и сжато-изгибаемых элементов стальных конструкций. Указаны требования к их конструированию. Даны примеры расчета и конструирования. Целью расчета металлических конструкций является строгое обоснование их габаритных размеров, размеров поперечных сечений и их соединений, обеспечивающих необходимую надежность, долговечность и экономичность. Эти требования часто противоречат друг другу, поэтому проектирование является процессом поиска оптимального решения.

В результате обзора научных работ было установлено, что авторы делают свои заключения относительно того, какие меры необходимо предпринять для улучшения надежности строительных конструкций. Эти выводы могут отличаться в зависимости от целей и задач каждой статьи. В данной статье с помощью функции распределения вероятности представлен расчет, по результатам которого можно оценить влияния допусков размеров поперечных сечений стальных прогонов на уровень надежности.

В сфере строительства и проектирования зданий и сооружений одним из ключевых аспектов является обеспечение надежности строительных конструкций. Согласно современным подходам к проектированию объект считается надежным, если он отвечает требованиям, предъявляемым к предельным состояниям при наиболее неблагоприятных сочетаниях нагрузок в течение всего расчетного срока службы.

Рассмотрим стальную балку с поперечным сечением в виде двутавра, обозначения размеров которого приведены на рисунке 1. Момент сопротивления сечения балки относительно оси x можно вычислить по формуле:

$$W_x \approx \frac{2}{h} \cdot \left(\frac{b \cdot h^3}{12} - 2 \cdot \left[\frac{b_w \cdot h_w^3}{12} \right] \right), \quad (1)$$

обозначения геометрических параметров приведены на рисунке 1.

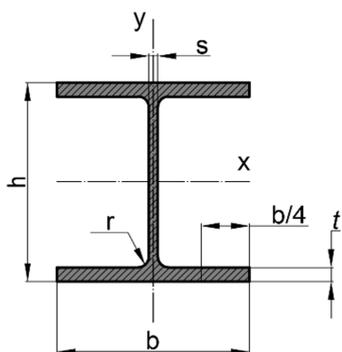


Рис. 1. Обозначения размеров поперечного сечения двутавра в соответствии с ГОСТ Р 57837-2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок»

Сравним допуски на двутавры по ГОСТУ Р 57837-2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок» и производителя двутавровых балок ЗАО «Сеспель» – они производят двутавровые балки по российским стандартам ГОСТ 8239-89. Примем за основу расчета двутавр 10Б1 со случайными параметрами по таблице. Исследуем безопасность прогонов в данной 3D-модели (рис. 2, 3).

По результатам генерации 100 000 значений по указанным в таблице параметрам можно получить функцию распределения для момента сопротивления рассматриваемого сечения (рис. 4). В запасе надежности рассматривается статистическая независимость параметров при вычислении момента сопротивления.

Таблица

Статистические параметры величин в математической модели

Параметр	Тип распределение	Параметры	Примечание
ГОСТ Р 57837-2017			
Ширина двутавра \tilde{b}	Равномерное	[52; 58] мм	Допуск ± 3 мм по ГОСТ Р 57837-2017
Высота двутавра \tilde{h}	Равномерное	[97; 103] мм	Допуск ± 3 мм по ГОСТ Р 57837-2017
Высота (ч) \tilde{h}_w	Равномерное	[87,1; 90,1] мм	Допуск толщины полки t $\pm 1,5$ мм по ГОСТ Р 57837-2017
Ширина (ч) \tilde{b}_w	Равномерное	[24,75; 26,15] мм	Допуск толщины полки t $\pm 0,7$ мм по ГОСТ Р 57837-2017
ГОСТ 8239-89			
Высота двутавра h	Равномерное	[98; 102] мм	Допуск ± 2 мм по ГОСТ 8239-89
Ширина полки b	Равномерное	[53; 57] мм	Допуск ± 2 мм по ГОСТ 8239-89
Толщина полки t	Равномерное	[3,8; 4,5] мм	Допуск $-0,4$ мм по ГОСТ 8239-89



Рис. 2. Общий вид модели

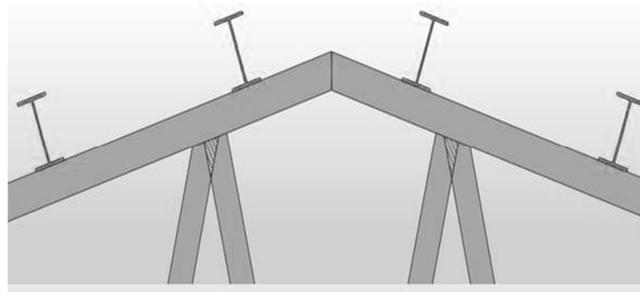


Рис. 3. Поперечный разрез

Проанализируем изменение вероятности отказа при изменении допуском на различные параметры двутавра. Пусть допуск на высоту двутавра составит ± 1 мм, при сохранении допуска толщины полки $t = \pm 1,5$ мм, а ширина двутавра также будет иметь пониженный допуск ± 2 мм; тогда границы для генерации значений примут следующий вид:

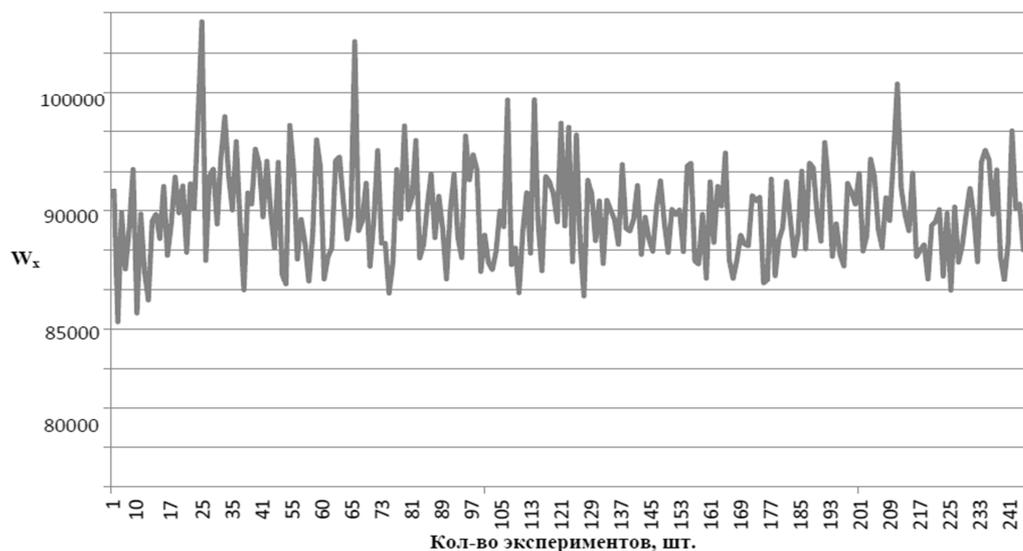


Рис. 4. Функция распределения вероятностей для момента инерции \tilde{W}_x , с допусками $\tilde{h} \in [99,101]$ мм, $\tilde{b} \in [53,57]$ мм по ГОСТ Р 57837-2017

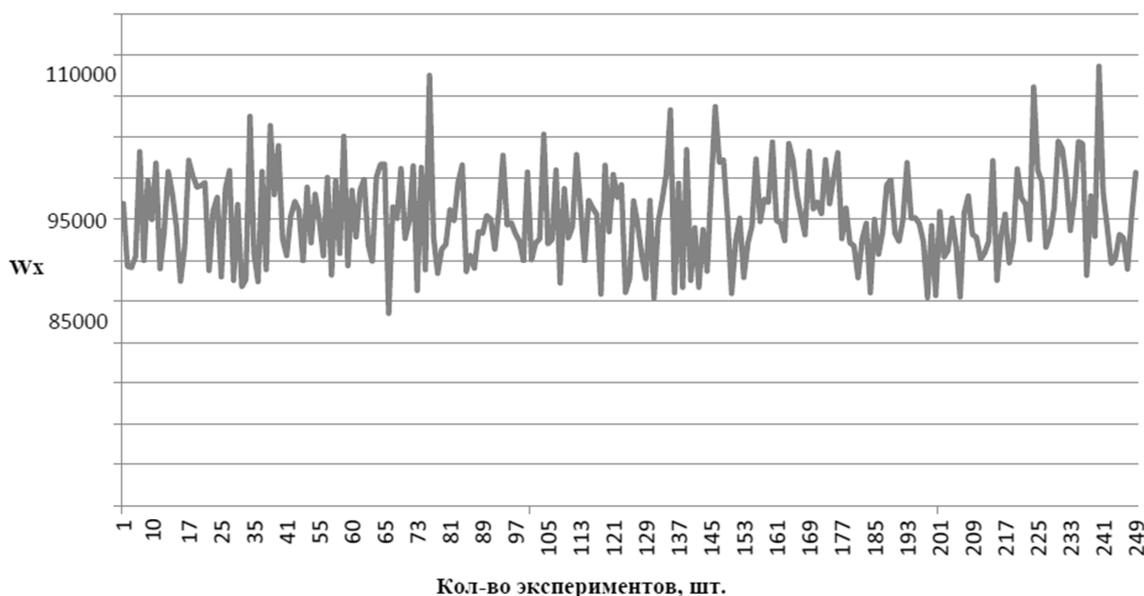


Рис. 5. Функция распределения вероятностей для момента инерции \tilde{W}_x , с допусками $h \in [53,57]$ мм, $b \in [98,102]$ мм по ГОСТ 8239-89

Таким образом, вероятность отказа стальной балки по ГОСТ Р 57837-2017 можно оценить как:

$$P_f \approx \frac{747}{100000} = 0,00747 \text{ или } 7,47 \%$$

При установке допусков ± 2 мм по высоте балки и до ± 2 мм по ширине полки и $-0,4$ мм по толщине полки по ГОСТУ 8239-89 получается определенный результат, выраженный в снижении вероятности отказа двутавра на 16,4 %.

Таким образом, исследование показало важность соблюдения точных допусков при изготовлении

стальных прогонов для достижения необходимого уровня надежности. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации производственных процессов и повышения безопасности строительных конструкций.

Для обеспечения высокого уровня надежности рекомендуется внедрить более строгие процедуры контроля качества на производстве, включая использование современных измерительных приборов и автоматизацию процесса проверки геометрических параметров.

Вероятностные подходы могут быть успешно использованы для обоснования уровня надежности различных типов конструкций [9–11].

Литература

1. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения : введен 2014-11-12. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 14 с.
2. Крупенина, Д. С. Надежность строительных конструкций на этапе проектирования / Д. С. Крупенина. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 14 (304). – С. 93–94.
3. Даулетбаев, Р. Б. Надежность строительных конструкций зданий и сооружений в процессе их эксплуатации [Текст] / Даулетбаев Р. Б., Вовк Б. В. // Журнал Инновации и инвестиции. – 2019. – № 5. – С. 173–176.
4. Тамразяна, А. Г. Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальном распределении нагрузки и несущей способности [Текст] / А. Г. Тамразяна // Вестник МГСУ. – 2012. – № 10. – С. 109–115.
5. Расчет и проектирование элементов металлических конструкций : учебно-методическое пособие / З. В. Беляева, С. В. Кудрявцев ; Министерство науки и высшего образования РФ ; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2019. – 136 с.
6. Соловьев, С. А. Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 10. – С. 1545–1555.
7. Шевцов, Л. С. Вероятностный подход в проектировании изгибаемых элементов из армированного арболита / Л. С. Шевцов, А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 2(20). – С. 15–17.
8. Соловьева, А. А. Вероятностные модели случайных величин в строительном проектировании / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2024. – 144 с.
9. Соловьева, А. А. Исследование прочностных показателей арболита при повышенной влажности / А. А. Соловьева, Л. С. Шевцов, С. А. Соловьев // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 1(19). – С. 33–35.
10. Solovev, S. A. Probabilistic Design of Flexural Cross-Laminated Timber Structural Elements / S. A. Solovev, V. M. Puchkov, A. A. Soloveva // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2024. – Vol. 20, № 2. – P. 99–108.
11. Соловьев, С. А. Надежность строительных конструкций: история, анализ, прогноз / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева. – Москва : АСВ, 2025. – 468 с.

A.A. Lisenev

Vologda State University

STUDY OF INFLUENCE OF STEEL GIRDERS CROSS SECTIONS SIZE TOLERANCES ON RELIABILITY LEVEL

The article presents an approach to the influence of the size tolerances of the cross sections of steel girders on the level of reliability. To assess the level of reliability, it is necessary to use methods of probability theory and mathematical statistics. It is important to take into account not only the average values of the parameters, but also their spread, which is characterized by a standard deviation. One approach is to use the Monte Carlo method to simulate random variations in the geometric characteristics of structural elements. Based on the data obtained, it is possible to estimate the probability of exceeding the permissible values and determine the level of risk of structural failure. Unlike the limit state method, based on the developed algorithms, it is possible to optimize the section of a steel element from the condition of an effective ratio of the safety criterion and the metal content of the structure.

Reliability, probabilistic design, steel beam, probability of failure, bending, state, uncertainty.