

УДК 624.04

**РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОТВЕРСТИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЕРФОРИРОВАННЫХ БАЛКАХ**

Ассистент Ю.Н. Круль

**РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ОТВОРІВ В МЕТАЛЕВИХ ПЕРФОРОВАНИХ БАЛКАХ**

Асистент Ю.М. Круль

**RATIONALIZATION HOLE OPTIONS IN PERFORATED METAL BEAMS**

Assistant Y.N. Krul

*У статті розглянута проблема раціоналізації параметрів перфорованих металевих пластин і знаходження оптимальних розмірів і конфігурації отворів. Для побудови раціональної конструкції передбачається формування спеціальних ітераційних алгоритмів, за допомогою яких покроково виробляється поліпшення геометричних та фізико-механічних параметрів конструктиву.*

**Ключові слова:** перфоровані пластини, раціональна конструкція, ітераційні процедури, оптимальні, конфігурація отворів.

*В статье рассмотрена проблема рационализации параметров перфорированных металлических пластин и нахождения оптимальных размеров и конфигурации отверстий. Для построения рациональной конструкции предполагается формирование специальных итерационных алгоритмов, с помощью которых пошагово производится улучшение геометрических и физико-механических параметров конструктива.*

**Ключевые слова:** перфорированные пластины, рациональная конструкция, итерационные процедуры, оптимальные, конфигурация отверстий.

*The paper deals with the problem of rationalizing the parameters of perforated metal sheets and determining the optimal size and configuration of the holes. To create the rational design we developed special iterative algorithms which ensure incremental improvement of geometrical, physical and mechanical parameters of structural elements. As variable parameters this paper adopts a configuration of holes, their height, relative to the original sheet, and the angle of the cut*

*line with the same number of holes. As the result we obtained the optimal configuration and the size of the holes and the optimal configuration of the cut for non-waste production of the laced beams. As a part of the study we selected the optimal parameters of holes in terms of the obtained values of the potential energy of deformation and the safety factor.*

**Keywords:** perforated plates, rational design, iterative procedure, the optimal configuration of holes.

**Введение.** Важным направлением совершенствования строительных конструкций является повышение их несущей способности при снижении материалоемкости и себестоимости.

Широкое распространение во всем мире получили перфорированные балки, изготавливаемые по безотходной технологии из прокатных профилей. В технической литературе такая балка получила несколько названий – балка с перфорированной стенкой, балка с развитым сечением, сквозная балка. Балки с перфорированной стенкой обеспечивают 20-30% экономии металла, по сравнению с прокатными балками и дешевле последних на 10-18% [1].

**Постановка проблемы.** Наиболее многогранное развитие балок со сквозной стенкой приходится на рубеж 50-60-х гг. прошлого века. В силу этого некоторые полученные результаты нуждаются в дополнении и уточнении. Разновидности сквозных балок весьма разнообразны и связаны, в первую очередь, с различной конфигурацией линии реза и как следствие различной формой и размеров отверстий. С целью определения оптимальных размеров и формы перфорации, появляются новые потребности исследования влияния различных параметров конструктивного оформления на напряженное состояние, несущую способность и устойчивость балок с перфорированной стенкой [2-6].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Исследование влияния различных параметров конструктивного оформления перфорированных балок на их напряженное состояние, несущую способность и устойчивость представлено в работах таких авторов, как М.Т. Беседина, Бирюлева, В.В. Козлякова, В.В. Холопцева, А.И. Притыкина, Е.В. Балашова и многих других. Несмотря на большое разнообразие существующих перфорированных балок, расплывчато представлены оптимальные размеры и конфигурация отверстий в перфорированных пластинах.

**Цели и задачи исследований.** Целью данной работы является определение при помощи энергетических принципов [7, 8] оптимальных размеров и конфигурации отверстий в перфорированных пластинах при чистом сдвиге.

**Основная часть.** Учитывая характер напряженно-деформированного состояния перфорированных пластин, оправданным может быть переход от обратных к прямым методам формирования параметров конструктива. Для построения рациональных конструкций предполагается формирование специальных итерационных алгоритмов, с помощью которых пошагово производится улучшение соответствующих геометрических и физико-механических параметров конструктива. Сказанное предопределяет разработку рациональных систем, удовлетворяющих необходимым инженерным, архитектурным и экономическим ограничениям.

Допустим, что предложенная конструкция перфорированной пластины характеризуется некоторыми параметрами. В работе [9] предлагается, из всего множества возможных значений искомым параметров выбирать такие, при которых, потенциальная энергия деформаций (ПЭД) достигает нижней границы, то есть

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), k=1, 2, \dots, \infty, (1)$$

где  $U$  – потенциальная энергия деформации системы;  $k$  – номер варианта сравнения;  $\alpha \in M$ ,  $M$  – множество допустимых значений геометрических параметров.

В качестве инструментария для определения оптимальных размеров и конфигурации отверстий был выбран программный комплекс на основе метода конечных элементов «SCAD Office». Стандартными средствами генерации расчетной схемы (балка-стенка) были получены модели перфорированных пластин из оболочек нулевой гауссовой кривизны (КЭ-21, КЭ-22), размерами 1x1x0,01 м, с преимущественным размером ячейки сетки

## Будівельні матеріали, конструкції та споруди

конечных элементов 0,1 м (рис. 1). Перед началом исследования проводилось тестирование конечно-элементной модели сгущением сетки конечных элементов и сопоставления результатов между собой.

Исследование проводилось в несколько этапов, в ходе которых определялись оптимальные сечения и размеры отверстий, при наименьшем расходе материала.

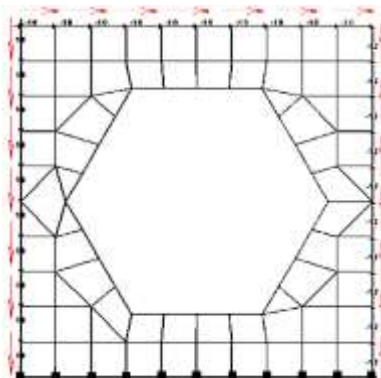


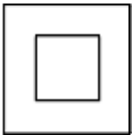
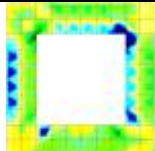
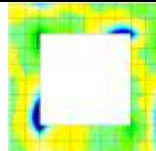
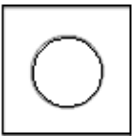
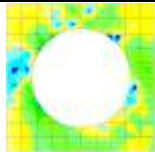
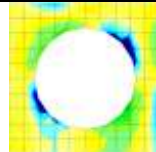
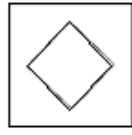
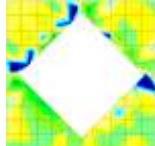

Рис. 1. Конечно-элементная модель перфорированной пластины


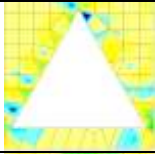
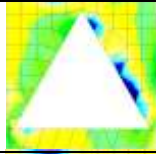
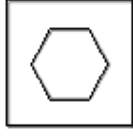
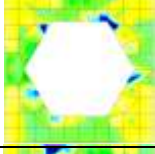
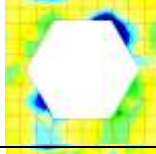
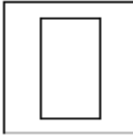
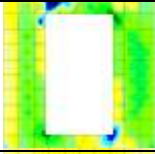
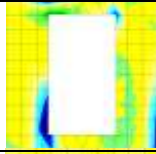
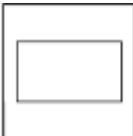
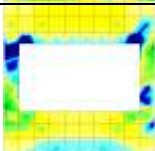
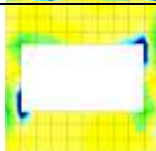
На первом этапе рассматривались различные конфигурации отверстий (круглые, квадратные, прямоугольные, шестиугольные, ромбовидные). В качестве неизменяемого параметра выступала площадь поперечного сечения отверстий. В ходе исследования, для каждого отверстия вычислялись значения потенциальной энергии деформации (ПЭД) и значения коэффициента запаса устойчивости. Расчеты показывают, что наименьшему значению ПЭД соответствуют отверстия в виде ромба (2,93) и круга (3,11) и соответствующие им

значения коэффициента потери устойчивости 3,62 и 3,76. Однако изготовление перфорированных элементов с данными конфигурациями отверстий влечет за собой повышенные затраты материала в виде отходов. Поэтому, с точки зрения наименьшего расхода материала выгодным является использование шестиугольных отверстий с соответствующими значениями ПЭД (3,73) и коэффициента потери устойчивости 3,73. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения общей потенциальной энергии деформации для перфорированных пластин одинаковой площади.

Конфигурация отверстий	U, кДж	$\tau_{xy}$	Коэффициент запаса устойчивости k	$N_x, \text{т/м}^2$
	5,74		3,55	
	3,11		3,76	
	2,93		3,62	

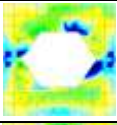
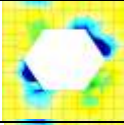
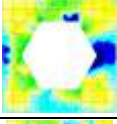
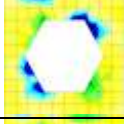
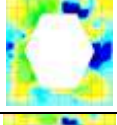
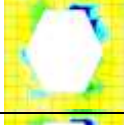
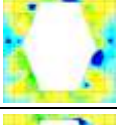
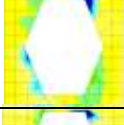


Конфигурация отверстий	U, кДж	$\tau_{xy}$	Коэффициент запаса устойчивости k	$N_x$ , т/м <sup>2</sup>
	5,3		2,64	
	3,41		3,73	
	6,00		3,91	
	12,3		2,43	

Задачей второго этапа исследований было изучения влияния высоты шестиугольного отверстия на значения ПЭД и коэффициента запаса устойчивости. При этом проводилось сравнение максимальных касательных напряжений  $\tau_{max}$ , возникших в

пластинах со значениями критических  $\tau_{кр}$ . В пластинах были вырезаны отверстия с соотношением высоты отверстия  $h_{отв}$  к высоте пластины  $H$  равным 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9. Результаты вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Значение потенциальной энергии деформации для шестиугольных отверстий различной высоты

$h_{отв}/H$	U, кДж	$\tau_{xy}$	$\tau_{max}$ , т/м <sup>2</sup>	Коэффициент запаса устойчивости k	$N_x$ , т/м <sup>2</sup>	$N_{max}$ , т/м <sup>2</sup>
0,5	1,78		2,19	4,53		5,51
0,6	2,35		2,65	4,25		8,65
0,7	3,16		3,9	4,05		8,69
0,8	4,86		4,4	3,7		12,6
0,9	8,31		11,4	3,39		25,46

## Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Из данных таблицы видно, что наиболее оптимальным, с точки зрения минимального расхода материала является такой раскрой, при котором отношение высоты отверстия к высоте всей пластины равно 0,7. При этом, максимальные касательные напряжения, возникающие в элементе не превышают допустимых. Расхождение составляет около 5%. На рисунке 2 и 3 показаны зависимости значения ПЭД и значения коэффициента запаса устойчивости от соотношения  $h_{отв}/H$ .

На третьем этапе моделирования исследовалось влияние ширины шестиугольного отверстия на значение ПЭД. В шестиугольнике с высотой равной 0,7 м ширина отверстия варьировалась при

помощи изменения угла наклонной прямой. Изменение угла производилось в диапазоне 40-70° с шагом итерации равным 5°. При этом ограничения выступали рекомендуемые значения длины перемычки, равные не менее 0,25 м на опорном участке и не менее 0,098 м в пролете. Полученные значения ПЭД для различных углов наклонной прямой шестиугольника и соответствующие им коэффициенты потери устойчивости представлены в таблице 3. На рисунках 4 и 5 показана зависимость значения ПЭД и значения коэффициента запаса устойчивости от угла наклонной линии реза.

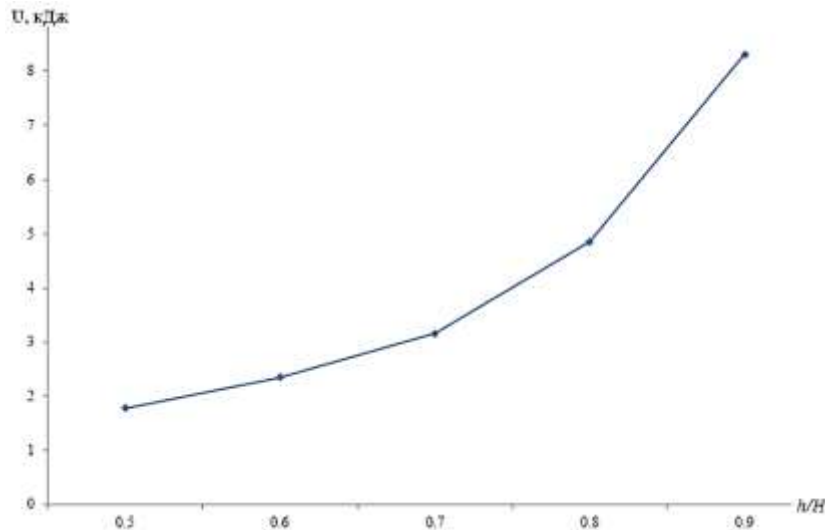


Рис. 2. Зависимость значения ПЭД от высоты отверстия в перфорированном элементе

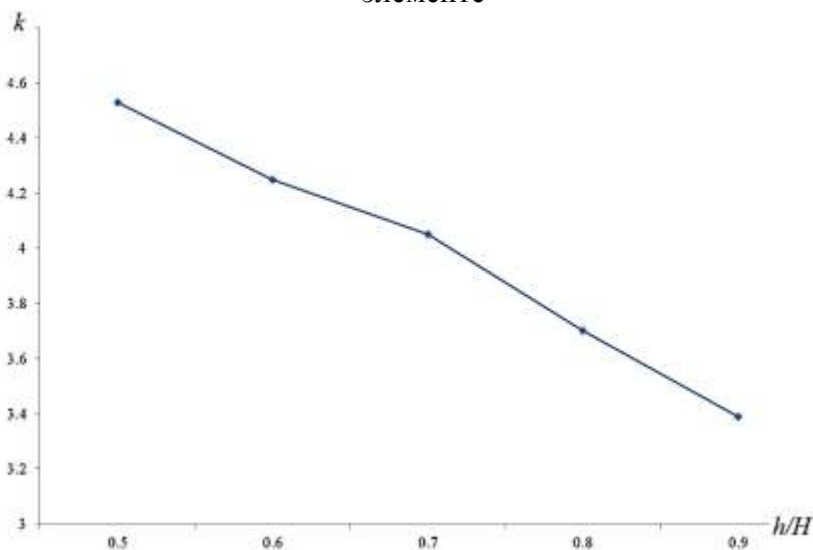

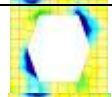


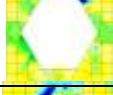

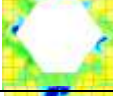

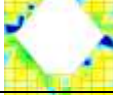





Рис. 3. Зависимость значения коэффициента запаса устойчивости от высоты отверстия в перфорированном элементе

Значение потенциальной энергии деформации для шестиугольных отверстий различной ширины

Угол наклонной прямой $\alpha$ , °	U, кДж	$\tau_{xy}$	$\tau_{max}$ , Т/М <sup>2</sup>	Коэффициент запаса устойчивости k	$N_x$ , Т/М <sup>2</sup>	$N_{max}$ , Т/М <sup>2</sup>
70	4,09		3,7	3,78		13,46
65	3,79		3,5	3,77		9,41
60	3,45		3,15	3,71		11,8
55	3,37		2,95	3,68		10,6
50	3,25		2,6	3,61		9,47
45	3,29		3,6	3,41		9,4

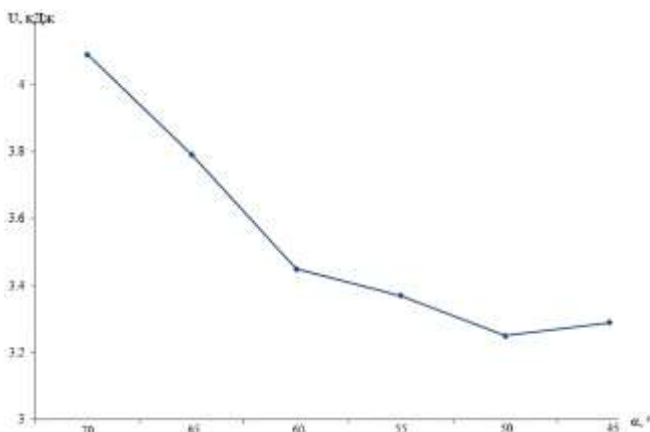


Рис. 4. Зависимость значения ПЭД от угла наклонной линии реза в перфорированном элементе

Как видно из графика, значение ПЭД уменьшается при уменьшении угла наклонной прямой. Нижней границы ПЭД достигает при значении угла 50°. Максимальные касательные напряжения, возникающие в элементе, не превышают допустимых значений.

**Выводы.** Таким образом, при помощи моделирования были получены оптимальные, с точки зрения наименьшего

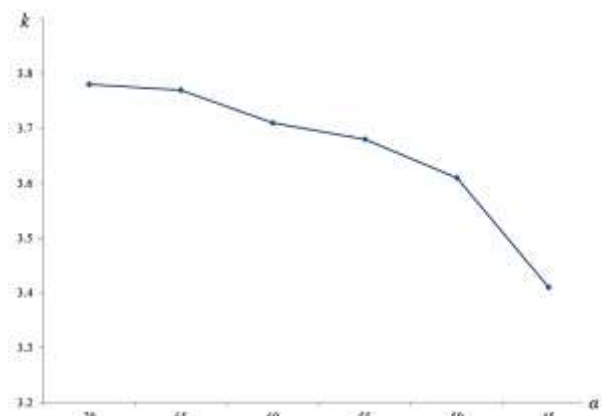


Рис. 5. Зависимость значения коэффициента запаса устойчивости от угла наклонной линии реза в перфорированном элементе

расхода материала, отверстия в перфорированной металлической пластине. Это, в свою очередь, позволяет получить рациональный раскрой при производстве перфорированных пластин по безотходной технологии.

Предложенные параметры отверстий в перфорированных пластинах представлены в работе [10].

### Список использованных источников

1. Бирюлёв В.В. Проектирование металлических конструкций: [Спец. курс. Учебное пособие для вузов] / Бирюлев В.В. – Л.: Стройиздат, 1990. – 432 с.

## **Будівельні матеріали, конструкції та споруди**

---

2. Притыкин А.И. Напряженное состояние пластины с шестиугольным вырезом при различных видах нагружения / А.И. Притыкин, С.В. Рудченко, Т.В. Рудченко // Судостроение и энергетические установки: сборник научных трудов КГТУ. – Калининград, 1996. – с. 118-121.
3. Притыкин А.И. Устойчивость пластины с шестиугольным вырезом при сдвиге / А.И. Притыкин // Материалы III международной конференции «Повышение эффективности использования технической базы регионов» / КГТУ – Калининград, 1996. – с. 87-90.
4. Притыкин А.И. Концентрация напряжений в балках с одним рядом шестиугольных отверстий / А.И. Притыкин // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ» / 2009. – №1 – с. 2-6.
5. Притыкин А.И. Предельная нагрузка перфорированной балки-стенки по критерию текучести перемычки / А.И. Притыкин // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ» / 2009. – №2 – с. 31-35.
6. Притыкин А.И. Местная устойчивость балок-стенок с шестиугольными вырезами / А.И. Притыкин // Строительная механика и расчет сооружений / 2011. – №1 – с. 2-6.
7. Васильков Г.В. Эволюционная теория жизненного цикла механических систем. Теория сооружений / Васильков Г.В. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 320 с.
8. Васильков Г.В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма / Васильков Г.В. – Ростов-на-Дону: ИнфоСервис, 2003. – 179 с.
9. Шмуклер В.С. Каркасные системы облегченного типа / Шмуклер В.С., Климов Ю.А., Бурак Н.П. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336с.
10. Шмуклер В. С. Новая конструкция сталежелезобетонного пролетного строения автомобильно-дорожных мостов / В. С. Шмуклер, Ю.Н. Круль // Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства: материалы III Международной научно-технической интернет-конференции. – Харьков: ХНАГХ, 2012. – 304 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор В.П.Кожушко

---

Круль Юрий Николаевич, ассистент кафедры мостов, конструкций и строительной механики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета контактный тел. 057-707-37-22  
Krul Yuri N., assistant of the Department of bridges, structures and structural mechanics Kharkov National Automobile and Highway University. contact tel. 057-707-37-22