

Анализ металлической кровли из гофрированного металлического листа на ударные нагрузки и уровни энергии для строительных конструкций

В.А. Кириллова, Л.Ю. Рыбакова

Самарский государственный технический университет

Аннотация: Кровля из гофрированного металлического листа широко используется как в сельских, так и в городских районах. Большую часть рынка, потребляемого кровлей из профнастила, составляют конструкции жилых домов. Что касается безопасности и надежности гофрированного металла против всех ударных нагрузок и уровней энергии, материал необходимо испытывать при определенных уровнях энергии, чтобы достичь параметров безопасности при любом наборе условий.

Ключевые слова: GL лист, теории отказов, поглощение энергии, энергия деформации, теория главного максимального напряжения, теория максимального напряжения сдвига, теория главной максимальной деформации, ударное напряжение, профнастил, металлический лист.

Введение. Кровля из гофрированного металлического листа изготавливается либо из оцинкованного железа, либо из алюминия, при этом лист GI подвержен быстрой коррозии цинка. Гофра делает тонкие листы достаточно жесткими, чтобы их можно было охватить между двумя прогонами без провисания. Таким образом, большая площадь может быть покрыта крышей с минимальным количеством поддерживающих конструкций, что делает крышу легкой и дешевой с минимальным использованием деревянного или стального каркаса. Тонкие калибровочные листы часто слишком непрочны, чтобы по ним ходить, и их можно поцарапать, проколоть или повредить сильным ветром. Одна из проблем кровли из листового металла заключается в плохой огнестойкости.

Данная проблема может быть решена за счет хорошего качества материала и качества изготовления. Кровля из гофрированного листового металла имеет следующие особенности:

- Особенность профнастила в том, что они легкие и быстро собираются и для кровли требуются средние строительные навыки.

- Металлический лист находится в среднем диапазоне с экономической точки зрения и широко используется для строительства зданий.
- Обеспечивает очень хорошую устойчивость к землетрясениям.
- Он обеспечивает хорошую защиту от дождя, но создает громкий шум.

Экспериментальная методология. Экспериментальный анализ проводился на оборудовании, которое представляет собой напольную ударную систему, рассчитанную на передачу от 0,59 до 757 Дж или до 1800 Дж без дополнительной высокоэнергетической системы. Технические характеристики: Диапазон 1 - Энергия от 0,59 до 1800 Дж. Скорость от 0,77 до 24 м/с. Высота падения (смоделированная) от 0,03 до 29,4 м. Машина оборудована системой взвешивания, которая измеряет общий вес падающей массы и вкладышей. Она также имеет климатическую камеру, которая может охлаждать образец до -70 или нагревать образец до + 150 градусов Цельсия, оборудована высокоэнергетической конфигурацией, а автоматическая система смазки устраняет эффекты трения между вставкой бачка и испытуемым образцом [1-3].

Существуют следующие теории отказов:

- Теория максимального главного напряжения и сдвига;
 - Теория максимальной главной деформации;
 - Общая энергия деформации и деформации сдвига на единицу объема;
- Мы будем предполагать все эти теории.

Теория максимального главного напряжения. Эта теория предполагает, что когда максимальное главное напряжение в сложной системе напряжений достигает предельного напряжения упругости при простом растяжении, произойдет разрушение. Следовательно, критерием разрушения будет: $\sigma_1 = \sigma_{ур}$

σ_{yp} - напряжение в пределе текучести при простом испытании на растяжение.

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - три главных напряжения в трехмерном сложном состоянии систем напряжений по порядку величины.

Для двумерной сложной системы напряжений выражается, как:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = \sigma_{yp}$$

Где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ напряжения в любой данной сложной системе напряжений [4-6].

Теория максимального напряжения сдвига. Эта теория утверждает, что разрушение можно предположить, когда максимальное напряжение сдвига в сложной системе напряжений равно значению максимального напряжения сдвига при простом растяжении. Критерий разрушения может быть установлен, как указано ниже. Для простого натяжного случая [7]:

$$\sigma_\theta = \sigma_y \sin^2 \theta, \quad \tau_\theta = \frac{1}{2} \sigma_y \sin 2\theta, \quad \tau_{max}^m = \frac{1}{2} \sigma_{yp}$$

В то время как для двумерной сложной системы:

$$\tau_{max}^m = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$
$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$
$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{1}{2} \sigma_{yp} \Rightarrow \sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_y$$
$$\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = \sigma_{yp}$$

Теория максимальной главной деформации: эта теория предполагает, что разрушение происходит, когда максимальная деформация для сложного состояния системы напряжений становится равной деформации в точке текучести в испытании на растяжение для трехмерного

сложного состояния системы напряжений. Полная энергия деформации U на единицу объема, равная полной работе, совершаемой системой, определяется уравнением [7].

$$U_t = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1 + \frac{1}{2} \sigma_2 \epsilon_2 + \frac{1}{2} \sigma_3 \epsilon_3, \quad \epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$
$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)], \quad \epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$
$$\frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{\sigma_3}{E} = \frac{\sigma_{yp}}{E}, \quad \sigma_1 - \nu \sigma_2 - \nu \sigma_3 = \sigma_{yp}$$

Общая энергия деформации на единицу объема: теория предполагает, что разрушение происходит, когда полная энергия деформации для сложного состояния системы напряжений равна таковой в пределе текучести при испытании на растяжение [7].

$$\frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] = \frac{\sigma_{yp}^2}{2E}$$
$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) = \sigma_{yp}^2$$

Теория максимальной энергии сдвига деформации на единицу объема: эта теория утверждает, что разрушение происходит, когда составляющая максимальной энергии сдвига деформации для сложного состояния системы напряжений равна таковой в пределе текучести в испытании на растяжение [7].

$$\frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{\sigma_{yp}^2}{6G}$$
$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = 2\sigma_{yp}^2$$

Как мы знаем, общее состояние напряжения можно разбить на две составляющие, т.е.:

- гидростатическое напряженное состояние (энергия деформации, связанная с гидростатическим напряженным состоянием, известна как энергия объемной деформации) [8].

- деформационное состояние напряжения (энергия деформации, связанная с этим, известна как энергия деформации сдвига), поскольку мы знаем, что энергия деформации из-за деформации выражается как:

$$U_{\text{искажения}} = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

Это энергия деформации искажения для сложного напряженного состояния и должно быть равно максимальной энергии искажения при простом испытании на растяжение. Мы можем предположить, что одно из основных напряжений достигает предела текучести материала [8]. Таким образом, подставляя выше уравнение $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, получаем энергию искажения для простейшего [9-10].

$$U_{\text{иск}} = \frac{2\sigma_1^2}{12G}$$

Результат испытаний образца GL.

Таблица №1

Результаты испытаний

№	Энергия удара (Дж)	Пиковая сила (N)	Пиковая энергия (ДЖ)	Общая энергия (Дж)
1	50	8588.22	45.233	51.26
2	80	9179.45	51.403	82.96
3	150	9177.88	47.306	74.95
4	203.28	9668.80	53.768	79.86

Образец, использованный для испытания, имел толщину 18 калибра. Подробный отчет представлен в таблице 1. Первый образец был испытан на энергию 50 Дж, полученная пиковая сила составила 8588,22 Н, и на этом уровне энергии материал показал упругую деформацию. Далее для следующих двух измерений образец был разрушен в условиях нагрузки, что

ясно указывает на то, что образец был небезопасен в условиях ударного нагружения. Финальный удар также демонстрирует упругую деформацию. Таким образом, исходя из значений энергии удара, ясно, что материал (лист GI) безопасен в пределах энергии от 50 до 80 Дж соответственно. Из таблицы видно, что образец 1 и образец 2 находятся в безопасных пределах, превышающих результаты образца 2, то есть при превышении энергии 80 Дж материал начнет свою пластическую деформацию соответственно.

Заключение. Из-за экономической цены и большей надежности гофрированные металлические кровли широко используются в сельских районах. Очень важно иметь подробную информацию о скорости поглощения энергии гофрированной металлической листовой кровлей. Металлическую кровлю необходимо испытать по энергетическим параметрам, чтобы убедиться в надежности кровли из листового металла. Чтобы обеспечить оптимальную конструкцию кровли из листового металла, поглощение энергии должно являться основным параметром при анализе материала.

Литература

1. Sagare P.M & Yadav Aditya. Analysis of automotive material under impact loads and energy levels. 2004. p. 256.
2. Thomas Nick. A study of early corrugated iron building in rural Scotland. Volume 3. 2002. pp. 589-595.
3. Jain Ashok Kumar and Punmia B.C. Building Construction 2006. pp. 214-216.
4. Ishaida Ahmed Abu. Case study on mechanical properties of concrete course aggregate using recycled plastic. 2003. pp. 123-124.

5. AS, NZS 4600:2005 Australian/New Zealand Standard. Cold-formed steel structures. Sydney Wellington: Standards Australia Standards New Zealand, 2005. pp. 291-302
6. Tusnina, O.A. A finite element analysis of cold-formed Z-purlins supported by sandwich panels. Applied Mechanics and Materials. 2013. pp. 398-403.
7. EN 1993-1-3:2009. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. – Brussels: CEN, 2006. pp. 512-518
8. Mahendran M. Applications of Finite Element Analysis in Structural Engineering. Proceedings International Conference on Computer Aided Engineering. 2007. pp. 38-46
9. Лавыгин Д.С., Леонтьев В.Л. Алгоритм смешанного метода конечных элементов решения задач теории отказов // Инженерный вестник Дона, 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910
10. Устименко Е.Е., Скачков С.В. Метод конечных элементов // Инженерный вестник Дона. 2019. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5768

References

1. Sagare P.M & Yadav Aditya. Analysis of automotive material under impact loads and energy levels. 2004. p. 256.
2. Thomas Nick. A study of early corrugated iron building in rural Scotland. Volume 3. 2002. pp. 589-595.
3. Jain Ashok Kumar and Punmia B.C. Building Construction 2006. pp. 214-216.
4. Ishaida Ahmed Abu. Case study on mechanical properties of concrete course aggregate using recycled plastic. 2003. pp. 123-124.



5. AS, NZS 4600:2005 Australian/New Zealand Standard. Cold-formed steel structures. Sydney Wellington: Standards Australia Standards New Zealand, 2005. pp. 291-302
6. Tusnina, O.A. A finite element analysis of cold-formed Z-purlins supported by sandwich panels. Applied Mechanics and Materials. 2013. pp. 398-403.
7. EN 1993-1-3:2009. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Brussels: CEN, 2006. pp. 512-518.
8. Mahendran M. Applications of Finite Element Analysis in Structural Engineering. Proceedings International Conference on Computer Aided Engineering. 2007. pp. 38-46.
9. Lavygin D.S., Leontev V.L. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1910
10. Ustimenko E.E., Skachkov S.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5768