

Оригами как средство поиска формообразования быстровозводимых сооружений

Ахтямова Р.Х.¹, Шаяхметова С.Р.¹.

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Целью исследования является изучение техник оригами для формообразования быстровозводимых сооружений и зданий после стихийных бедствий. К задачам данной работы относятся: выявление характеристик для оценивания моделей оригами, оценка структурных свойств модели оригами при разных состояниях и характеристиках. Результатом исследования является выведение техник и схем оригами, учитывающих характеристики для временной архитектуры быстрого реагирования.

Ключевые слова: оригами, временная архитектура, быстровозводимые сооружения, мобильная архитектура, архитектура быстрого реагирования.

Для цитирования: Ахтямова Р.Х., Шаяхметова С.Р. Оригами как средство поиска формообразования быстровозводимых сооружений // Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика, 2024, 1 (5), с. 23-31

Origami as a means of searching for the shaping of prefabricated structures

Akhtyamova R.H.¹, Shaiakhmetova S.R.¹.

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract. The aim of the research is to study origami techniques that correspond to the characteristics of prefabricated structures and buildings after natural disasters. The objectives of this work include: identification of the characteristics of temporary structures after natural disasters, assessment of the structural properties of the origami model under different conditions, and characteristics. The result of the study is the derivation of origami techniques and schemes that take into account the characteristics for a temporary rapid response architecture.

Keywords: origami, temporary architecture, prefabricated structures, mobile architecture, rapid response architecture.

For citation: Akhtyamova R.H., Shaiakhmetova S.R. Origami as a means of searching for the shaping of prefabricated structures // Architecture. Restoration. Design. Urban science, 2024, 1 (5), pp. 23-31

1. Введение

В современном мире происходит бесчисленное количество катастроф, которые лишают людей привычного уклада жизни [1]. Особенно опасны природные катаклизмы, происходящие внезапно и подвергающие риску большие площади территорий. Временные сооружения после стихийных бедствий решают базовые потребности людей. Сооружения такого типа имеют особые конструкции, отвечающие критериям быстровозводимости. Изучение методов разработок оболочек для таких сооружений является

одним из важных моментов в создании временного жилья. Главной задачей архитектурной части является процесс поиска формы, вдохновленный оригами – японским искусством складывания бумаги. Оригами, основанное на простой технике, создает вариативность формы [2-4]. Оригами используется инженерами для быстрого прототипирования конструкций адаптивных структур и механических метаматериалов¹ [5].

Междисциплинарный подход к изучению оригами исследует математические, архитектурные и структурные аспекты складчатых конструкций, что помогает понять, как бумажная складка может быть использована в качестве средства для решения структурных и эстетических проблем. В этом контексте оригами представляет собой инструмент для получения опыта по пространственным конфигурациям и поиску форм, а также выступает как средство для дальнейших морфологических исследований в процессе архитектурного проектирования [6].

Бумага была предпочтительным материалом для художников оригами, стремящихся создавать сложные шедевры, с момента первого зарегистрированного оригами в Японии в 6-м веке [7]. Бумага имеет очевидные преимущества, обладая низкой жесткостью на изгиб, что позволяет легко складывать и сгибать материал для достижения широкого разнообразия форм [8]. Эти свойства также позволили инженерам оригами быстро создавать прототипы адаптивных структур и механических метаматериалов, облегчая коммуникацию [9-11] и валидацию [12-15].

Временные сооружения после бедствий представляют собой универсальные модульные быстровозводимые и простые в сборке конструкции. Они могут быть различны по форме и масштабу. Использование техники оригами позволяет на моделях из бумаги посмотреть, как будут вести себя различные формы, типы оригами-схем в разных ситуациях: при сжатии (в свернутом виде) и в разжатом (развернутом) виде [16]. Это требуется для того, чтобы понять, как себя поведут будущие конструктивные элементы при сборке и транспортировке. Важно учитывать, что они должны иметь минимальные габаритные размеры и вес в свернутом виде, так как данная конструкция будет транспортироваться в короткие сроки и беспрепятственно доставляться в пункт назначения.

Целью исследования является изучение техник оригами для формообразования быстровозводимых сооружений и зданий после стихийных бедствий.

В данной статье поставлены следующие задачи:

- выявление характеристик для оценивания моделей оригами;
- оценка структурных свойств модели оригами при разных состояниях и характеристиках.

¹ Механический метаматериал или структурный метаматериал — это разновидность метаматериала с уникальными механическими свойствами, обусловленными его структурой. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/mechanical-metamaterials>

2. Методы

В исследовательской работе были использованы методы макетирования и анализа с использованием матричного подхода. Был проведен анализ существующих схем для оригами. Отобраны 17 наиболее репрезентативных типов схем, которые были смоделированы и проанализированы с помощью таких характеристик как компактность, модульность, жесткость, простота сборки, минимальные габаритные размеры. Оценка характеристик проводилась методом анализа и эксперимента с помощью матрицы, в которой знак «галочка» соответствует значению «удовлетворяет условию», а «крест» – «не удовлетворяет условию». Компактность определяется условиями сжимаемости модели до максимального сложенного состояния («галочка» – максимальная сжимаемость, «крест» – невозможность уменьшаться, сжиматься). Модульность оценивается условиями наличия в структуре оригами модуля, который можно будет в дальнейшем видоизменять по масштабу, количеству («галочка» – имеет модульность, «крест» – не имеет модульности). Условие для оценки жесткости – выдерживать нагрузки, не деформируя форму. Проводился эксперимент, где к каждой модели оригами из бумаги с размерами на 10*10 см прикладывался груз с весом 6, 60 и 100 грамм («галочка» – выдерживает нагрузку, не деформируется, «крест» – выдерживает нагрузку, деформируется). Простота сборки: «галочка» – модель быстро разворачивается, «крест» – плохо разворачивается. Минимальные габаритные размеры: «галочка» – минимальный размер при максимально сжатом (сложенном) виде, «крест» – в сложенном виде габариты модели несильно изменяются, остаются в больших формах.

3. Результаты и обсуждение

Важными характеристиками для оценивания моделей элементов из оригами для быстровозводимых сооружений являются компактность, модульность, жесткость, простота сборки и минимальные габаритные размеры (рис.1). Выявленные характеристики дают возможность оценить эффективность и надежность быстровозводимых сооружений: компактность и минимальные габаритные размеры упрощают транспортировку и хранение, модульность ускоряет процесс сборки, а жесткость и простота сборки гарантируют долговечность и устойчивость конструкции.

Компактность

Под компактностью подразумевается способность материала или конструкции сжиматься, уменьшаться в размерах без деформации формы, т.е. возможность конструкции быстро разворачиваться и быстро складываться. В конструкциях оригами это свойство позволяет существенно уменьшить объем, когда конструкция находится в сложенном состоянии, тем самым повышая эффективность транспортировки. Сжимаемые конструкции могут быть приспособлены к различным условиям хранения, что облегчает практическое применение в различных сценариях. Кроме того, использование

сжимаемости часто приводит к созданию легких конструкций, что положительно сказывается на качестве конструкции и логистике развертывания. Компактность сочетается с другими характеристиками, позволяя получить минимально возможный размер в сложенном виде без существенного ущерба для жесткости и прочности при развертывании.

Возможность сжатия конструкции до компактных размеров достигается путем использования геометрических схем и материалов, способных обратимо деформироваться.

По рис.1 можно понять, что формы под номерами 2,10,12,16 имеют низкую степень сжимаемости из-за формы, углов и направлений складок.

Модульность

Модульность относится к принципу проектирования систем, состоящих из отдельных модулей или узлов, которые могут быть созданы и собраны независимо друг от друга. В оригами модульность облегчает создание сложных геометрических форм за счет сочетания более простых элементов. Эта характеристика повышает адаптивность, позволяя легко реконфигурировать конструкции в соответствии с различными пространственными или функциональными требованиями. Кроме того, модульные конструкции позволяют оптимизировать производственные процессы и упростить техническое обслуживание, поскольку отдельные модули могут быть заменены или отремонтированы без необходимости разборки всей конструкции.

Во всех моделях каждый элемент оригами является модулем, который в дальнейшем может размножиться, масштабироваться для создания различных форм для оболочек сооружений (рис.1).

Жесткость

Жесткость – это показатель способности конструкции противостоять деформации под действием приложенных усилий [17-19]. Для складываемых конструкций оригами важно сохранять структурную целостность во время развертывания и при эксплуатационных нагрузках. Повышенная жесткость способствует стабильности и функциональности конструкции, гарантируя, что сложенная конструкция сможет противостоять воздействиям окружающей среды, таким как ветер и распределение нагрузок. Жесткость может быть достигнута за счет особого расположения складок, выбора материала и геометрии конфигурации оригами. Конструкции, сочетающие в себе жесткость и легкость, обеспечивают оптимальный баланс, позволяя выполнять крупномасштабные работы без чрезмерных ограничений по весу.

Все сложенные из бумаги модели вели себя по-разному при различных деформациях (сжатие и растяжение). Например, модели, которые имеют уже в себе модульность, четкие геометрические фигуры, в основе которых треугольник, шестиугольник или квадрат, являются более устойчивыми, сохраняют свои формы (рис.1).

					00	01	02	03	04
1					✓	✓	✓	✓	✓
2					✗	✓	✓	✓	✗
3					✓	✓	✓	✓	✓
4					✓	✓	✓	✓	✓
5					✓	✓	✓	✓	✓
6					✓	✓	✓	✓	✓
7					✓	✓	✓	✓	✓
8					✓	✓	✓	✓	✓
9					✓	✓	✓	✓	✓
10					✗	✓	✓	✓	✗
11					✓	✓	✓	✓	✓
12					✗	✓	✓	✓	✗
13					✓	✓	✓	✓	✓
14					✓	✓	✓	✓	✓
15					✓	✓	✓	✓	✓
16					✗	✓	✓	✓	✗
17					✓	✓	✓	✓	✓

Рис. 1. Матрица техник оригами с характеристиками. Модели разработаны в виде оригами в разных состояниях (в сжатом и развернутом состоянии). Характеристики: 00 – компактность, 01 – модульность, 02 – жесткость, 03 – простота сборки, 04 – минимальные габариты размера
(Источник: авторская разработка)

Простота сборки

Простота сборки (быстрая разворачиваемость модели) означает скорость и эффективность перехода от сохраненного (свернутого) состояния к развернутому. Этот параметр имеет решающее значение для сооружений, требующих быстрого реагирования, таких как аварийные убежища или

временная инфраструктура в сценариях оказания помощи при стихийных бедствиях. Скорость разворачивания зависит от конструкции складок оригами, используемых материалов и механизмов, помогающих в процессе разворачивания. Ускоренное разворачивание сводит к минимуму время простоя и повышает удобство использования конструкции, тем самым повышая ее ценность в условиях нехватки времени.

Все проанализированные формы относительно быстро разворачиваются из сложенного состояния. Есть среди них несколько видов (под номерами 10 и 12), плохо разворачивающихся из-за своей формы, местоположения и вида складок, которые придают модели максимальную жесткость, что не дает ей видоизменяться (рис.1).

Минимальные габаритные размеры

Минимальные габаритные размеры относятся к объему, занимаемому конструкцией в сложенном виде. В контексте складываемых конструкций оригами минимизация размеров имеет важное значение для эффективной транспортировки, хранения и разворачивания. Компактные конфигурации обеспечивают экономию места, а также снижают логистические проблемы и затраты, связанные с транспортировкой крупногабаритных конструкций. Кроме того, достижение минимальных размеров часто повышает скорость разворачивания и простоту использования.

Большую сжимаемость имеют модели с линейными типами схем без четких геометрических форм. Например, оригами под номерами 1, 3, 4, 8, 13, 17 (рис.1) с большой степенью сжимаемости имеют минимальные габаритные размеры, что является преимуществом для сооружений временного типа.

4. Заключение

В ходе работы были выявлены характеристики оценивания моделей оригами для формообразования быстровозводимых сооружений и зданий после стихийных бедствий: компактность, модульность, жесткость, простота сборки, минимальные габаритные размеры. Данные характеристики послужат контрольным списком для проверки формообразующих решений при проектировании.

Характеристики взаимосвязаны и влияют друг на друга. Например, модульность способствует быстрой разворачиваемости, а жесткость обеспечивает устойчивость при компактных габаритах. При разработке оригами-моделей для разворачиваемых сооружений необходимо тщательно балансировать этими характеристиками, чтобы создать оптимальную конструкцию, учитывающую все требования и условия эксплуатации.

По оценке структурных свойств оригами при разных состояниях и характеристиках можно сделать выводы о том, что степень сжимаемости формы зависит от углов и направлений складок, что отражается на компактности модели. Каждый компонент оригами представляет собой модуль, который можно видоизменять для формирования разнообразных

структур оболочек зданий. Модели оригами за счет своих форм и структуры выдерживают нагрузки, не деформируясь, доказывая устойчивость. Благодаря технике складывания оригами модели имеют быструю разворачиваемость, что в дальнейшем положительно повлияет на создание оболочек из структурных материалов для временных быстровозводимых сооружений и зданий после стихийных бедствий. Минимальных размеров достигают линейные типы схем, что является важным параметром для транспортировки временного быстровозводимого сооружения. Выполненный в статье анализ способствует разработке решений для формообразования оболочек быстровозводимых сооружений.

Список литературы

1. Пономарев Е.С., Арсентьева К.Е. Моделирование жилой среды на основе принципов динамической архитектуры для экстремальных условий // Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика. – 2023. – № 1(1). – С. 4-12. – EDN VSOSVP.
2. Buri, Hani & Weinand, Yves. (2008). ORIGAMI - Folded Plate Structures, Architecture.
3. Бугаева П. А. Принципы оригами в архитектурных структурах // Стратегические направления развития науки, образования, технологий. – 2017. – С. 66-69.
4. Раева А. Т., Винницкий М. В., Третьяков Д. И. Принципы оригами в формировании зданий и сооружений // Проблемы «зеленой» архитектуры и устойчивого развития городов. – 2018. – С. 128-134.
5. Коновалова О. Б., Костылева В. В., Юмашев Е. М. Кинетические поверхности оригами в дизайне // Дизайн и технологии. – 2020. – №. 75. – С. 25-29.
6. Grey, Steven & Scarpa, Fabrizio & Schenk, Mark. (2020). Mechanics of Paper-Folded Origami: A Cautionary Tale. Mechanics Research Communications. 107. 10.1016/j.mechrescom.2020.103540.
7. Megahed, Naglaa. (2017). Origami Folding and its Potential for Architecture Students. The Design Journal. 20. 1-19. 10.1080/14606925.2017.1270511.
8. Robinson, N., 2004. The Origami Bible: A Practical Guide to the Art of Paper Folding. Pavilion Books.
9. Lang, R.J., 2012. Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art. 2nd ed.
10. Gillman, A., Fuchi, K., Buskohl, P.R., 2018. Truss-based nonlinear mechanical analysis for origami structures exhibiting bifurcation and limit point instabilities. International Journal of Solids and Structures 0, 1–14. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2018.05.011.
11. Lv, C., Krishnaraju, D., Konjevod, G., Yu, H., Jiang, H., 2015. Origami based Mechanical Metamaterials. Scientific Reports 4, 5979. doi:10.1038/srep05979.

12. Tolley, M.T., Felton, S.M., Miyashita, S., Aukes, D., Rus, D., Wood, R.J., 2014. Self-folding origami: shape memory composites actuated by uniform heating. *Smart Materials and Structures* 23, 094006. doi:10.1088/0964-1726/23/9/094006.
13. Dudte, L.H., Vouga, E., Tachi, T., Mahadevan, L., 2016. Programming curvature using origami tessellations. *Nature Materials* 15, 583–588. doi:10.1038/nmat4540.
14. Grey, S.W., Scarpa, F., Schenk, M., 2019. Strain Reversal in Actuated Origami Structures. *Physical Review Letters* 123, 025501. doi:10.1103/PhysRevLett.123.025501.
15. Ivashtenko, O., Kofman, P., Golubov, O., Maizelis, Z., 2019. Origami launcher. *Emergent Scientist* 3, 5. doi:10.1051/emsci/2019004, arXiv:1904.06409.
16. Silverberg, J.L., Na, J., Evans, A.A., Liu, B., Hull, T.C., Santangelo, C.D., Lang, R.J., Hayward, R.C., Cohen, I., 2015. Origami structures with a critical transition to bistability arising from hidden degrees of freedom. *Nature materials* 14, 389–93. doi:10.1038/nmat4232.
17. Шакиров А.Р., Сулейманов А.М. Выбор конструктивно-подобного образца для испытания на ползучесть клеевых соединений элементов усиления конструкций // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – № 4(66). – С. 8-16. – DOI 10.52409/20731523_2023_4_8. – EDN AIRICV.
18. Антонов А.С., Алитдинова Р.Э., Галимов Р.Р., Шмелев Г.Н., Валиев И.Р. Конструкции узла крепления фасадной системы к зданию // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 3(69). – С. 130-138. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/69.12. – EDN ITHRUL.
19. Мирсаяпов И.Т., Гиматдинов И.М. Расчет сталежелезобетонной балки на основе двухлинейной диаграммы деформирования // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – № 3(69). – С. 118-129. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/69.11. – EDN IPUFWM.

References

1. Ponomarev E.S., Arsentieva K.E. Modeling of the residential environment based on the principles of dynamic architecture for extreme conditions // A. R. D. U. – 2023. – № 1(1). – P. 4-12. – EDN VSOSVP.
2. Buri, Hani & Weinand, Yves. (2008). ORIGAMI - Folded Plate Structures, Architecture.
3. Bugaeva P. A. Principles of origami in architectural structures // Strategic directions for the development of science, education, and technology. - 2017. – P. 66-69.
4. Raeva A. T., Vinnitskiy M. V., Tretyakov D. I. Principles of origami in the formation of buildings and structures // Problems of "green" architecture and sustainable urban development. - 2018. – P. 128-134.

5. Konovalova O. B., Kostyleva V. V., Yumashev E. M. Kinetic origami surfaces in design // *Design and technology*. – 2020. – №. 75. – P. 25-29.
6. Grey, Steven & Scarpa, Fabrizio & Schenk, Mark. (2020). *Mechanics of Paper-Folded Origami: A Cautionary Tale*. *Mechanics Research Communications*. 107. 10.1016/j.mechrescom.2020.103540.
7. Megahed, Naglaa. (2017). Origami Folding and its Potential for Architecture Students. *The Design Journal*. 20. 1-19. 10.1080/14606925.2017.1270511.
8. Robinson, N., 2004. *The Origami Bible: A Practical Guide to the Art of Paper Folding*. Pavilion Books.
9. Lang, R.J., 2012. *Origami Design Secrets: Mathematical Methods for an Ancient Art*. 2nd ed.
10. Gillman, A., Fuchi, K., Buskohl, P.R., 2018. Truss-based nonlinear mechanical analysis for origami structures exhibiting bifurcation and limit point instabilities. *International Journal of Solids and Structures* 0, 1–14. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2018.05.011.
11. Lv, C., Krishnaraju, D., Konjevod, G., Yu, H., Jiang, H., 2015. Origami based Mechanical Metamaterials. *Scientific Reports* 4, 5979. doi:10.1038/srep05979.
12. Tolley, M.T., Felton, S.M., Miyashita, S., Aukes, D., Rus, D., Wood, R.J., 2014. Self-folding origami: shape memory composites activated by uniform heating. *Smart Materials and Structures* 23, 094006. doi:10.1088/0964-1726/23/9/094006.
13. Dudte, L.H., Vouga, E., Tachi, T., Mahadevan, L., 2016. Programming curvature using origami tessellations. *Nature Materials* 15, 583–588. doi:10.1038/nmat4540.
14. Grey, S.W., Scarpa, F., Schenk, M., 2019. Strain Reversal in Actuated Origami Structures. *Physical Review Letters* 123, 025501. doi:10.1103/PhysRevLett.123.025501.
15. Ivashtenko, O., Kofman, P., Golubov, O., Maizelis, Z., 2019. Origami launcher. *Emergent Scientist* 3, 5. doi:10.1051/emsci/2019004, arXiv:1904.06409.
16. Silverberg, J.L., Na, J., Evans, A.A., Liu, B., Hull, T.C., Santangelo, C.D., Lang, R.J., Hayward, R.C., Cohen, I., 2015. Origami structures with a critical transition to bistability arising from hidden degrees of freedom. *Nature materials* 14, 389–93. doi:10.1038/nmat4232.
17. Shakirov A.R., Suleymanov A.M. Selection of a structurally similar sample for creep testing of adhesive joints of structural reinforcement elements // *News KSUAE*. – 2023. – № 4(66). – P. 8-16. – DOI 10.52409/20731523_2023_4_8. – EDN AIRICV.
18. Antonov A.S., Alitdinova R.E., Galimov R.R., Shmelev G.N., Valiev I.R. Constructions of the attachment point of the facade system to the building // *News KSUAE*. – 2024. – № 3(69). – P. 130-138. – DOI 10.48612/News of KSUAE/69.12. – EDN ITHRUL.
19. Mirsayapov I.T., Gimatdinov I.M. Calculation of a reinforced concrete beam based on a two-line deformation diagram // *News of KSUAE*. – 2024. – № 3(69). – P. 118-129. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/69.11. – EDN IPUFWM.