



ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ САМОЗАКЛИНИВАЮЩИХСЯ СТРУКТУР ИЗ КУБИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Константинов Д.В., Пивоварова К.Г., Песин А.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Представляемая работа является продолжением ранее опубликованных исследований базовых закономерностей поведения самозаклинивающихся структур в различных условиях нагружения. На основе конечно-элементного компьютерного моделирования был проведен анализ напряженного состояния ряда самозаклинивающихся структур из кубических элементов. В программном комплексе конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus был проведен анализ способности самозаклинивающихся структур, состоящих из нескольких слоев, рассеивать точечную и объемную внешнюю нагрузку. Полученные результаты моделирования продемонстрировали широкий теоретический потенциал, ключевые ограничения применимости и основные паттерны распределения напряжений при использовании двух- и десятислойных конструкций из самозаклинивающихся структур. Продемонстрировано, что подобного рода конструкции отлично подходят для рассеивания распределенной по поверхности нагрузки, однако должны быть оценены с позиции рационального количества используемых слоев и элементов, так как при нагрузках определенной величины (и в ряде точек их прикладывания) отдельные слои не будут вовлечены в работу, но приведут к росту общего веса или усложнению конструкции. Также на основе результатов моделирования установлено, что при варьировании размеров элементов в отдельных слоях отдельное внимание должно быть уделено стабильности подобных конструкций, так как в ряде условий нагружения конструкция полностью разрушалась. В частности, в работе исследован случай двухслойной структуры с двукратной разницей в линейных размерах кубических элементов, в котором при нагружении со стороны более мелких элементов происходило неравномерное распределение напряжений и, как следствие, полное разрушение. Приведены первичные предварительные результаты применения сэндвич-панели, изготовленной с применением самозаклинивающейся структуры, позволяющей снизить локализованные значения контактных напряжений за счет увеличения площади контактного пятна вследствие внутреннего перераспределения напряжений. Анализ следов контактного давления на панели и на деформируемой с ее помощью заготовке показал, что на деформируемую заготовку попадает практически в два раза меньшее давление, но само пятно контакта больше и равномернее.

Ключевые слова: многослойные самозаклинивающиеся структуры, конечно-элементное моделирование, перераспределение нагрузки, комплексное нагружение, сэндвич-панели

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/>, и финансовой поддержки Челябинской области.

© Константинов Д.В., Пивоварова К.Г., Песин А.М., 2024

Для цитирования

Константинов Д.В., Пивоварова К.Г., Песин А.М. Исследование напряженного состояния многослойных самозаклинивающихся структур из кубических элементов на основе конечно-элементного моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 156-165. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-156-165>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

FEM STUDY ON THE STRESS STATE OF MULTILAYER SELF-INTERLOCKING STRUCTURES MADE OF CUBIC ELEMENTS

Konstantinov D.V., Pivovarova K.G., Pesin A.M.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The presented research paper is a continuation of previously published studies on the basic patterns of behavior of self-interlocking structures under various loading conditions. Finite element computer modeling was used to analyze the stress state of a few of self-interlocking structures made of cubic elements. The SIMULIA Abaqus finite element analysis software package was applied to analyze the ability of self-interlocking structures consisting of several layers to dissipate point and volumetric external loads. The obtained simulation results demonstrated a broad theoretical potential, key applicability limitations, and main stress distribution patterns, when using two- and ten-layer self-interlocking structures. It has been demonstrated that structures of this kind are excellent for dissipating a load distributed over the surface, but they are to be assessed from the perspective of a rational number of layers and elements used, since under loads of a certain value (and at a number of points of their application) individual layers will not be involved in the work, but will lead to an increase in total weight or complication of the design. Based on the modeling results, it was also established that when varying the sizes of elements in individual layers, special attention should be paid to the stability of such structures, since under a number of loading conditions the structure was completely damaged. In particular, the study investigated the case of a two-layer structure with a two-fold difference in the linear dimensions of cubic elements, when load of smaller elements resulted in an uneven distribution of stresses and, as a consequence, complete destruction. The paper presents initial preliminary results of using a sandwich panel manufactured using a self-interlocking structure, which makes it possible to reduce localized values of contact stresses by increasing the area of the contact spot due to internal stress redistribution. The analysis of traces of contact pressure on the panel and on the workpiece deformed with its help showed that pressure applied to the workpiece being deformed was almost half as much, but the contact spot itself was larger and more uniform.

Keywords: multilayer self-interlocking structures, finite element modeling, load redistribution, complex loading, sandwich panels

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No.22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/>, and the Chelyabinsk Region.

For citation

Konstantinov D.V., Pivovarova K.G., Pesin A.M. Fem Study on the Stress State of Multilayer Self-Interlocking Structures Made of Cubic Elements. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 156-165. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-156-165>

Введение

Рассеивание и контролируемое перераспределение импульсных нагрузок является одной из типовых задач при проектировании инженерных конструкций и строительных сооружений. Особенно остро эта проблема стоит в области проектирования объектов, которые эксплуатируются в сложно прогнозируемых или экстремальных условиях. Поэтому помимо эффективности применения становятся важными простота, гибкость и универсальность применяемых инженерных решений. Альтернативой в данном случае могут стать так называемые самозаклинивающиеся структуры, анализ которых до последнего времени ограничивался математическими задачами разного уровня. Известно, что в пространстве размерностью три и выше имеет место феномен самозаклинивающих структур.

Самозаклинивающаяся структура – это так спози-

ционированный набор выпуклых тел с неперекрывающимися внутренностями, что если зафиксировать все кроме любого одного, оставшееся нельзя «унести на бесконечность».

История открытия самозаклинивающих структур, а также их примеры и приложения подробно представлены в работах [1-3]. Данная тема получила известность как в области исключительно теоретической математики, так и в приложениях как к архитектуре, так и к естественным наукам [4]. Ей посвящен ряд статей [1-3, 5-7] как в популярных [4], так и в высокорейтинговых журналах, включая “Nature” [8]. На данный момент подобная идея уже используется при создании бронежилетов и баллистических заграждений.

В разное время возникали различные группы исследователей, например Thomas Siegmund’s group, MYMECH, Francois Barthelat, Yves Brechet, Andrey

Molotnikov, Giuseppe Fallacara и др. [9-13]. Имеющиеся структуры базируются на рассмотрении слоев из кубов, тетраэдров и октаэдров, а также их вариациях. Данные структуры обладают особенностью: при фиксации границы по периметру структура становится жесткой и не проваливается.

Помимо квазиплоских структур, имеются структуры, в которых заклинивание происходит в нескольких слоях одновременно. Это вопросы, относящиеся к облицовке плоского слоя с фиксированным периметром. Следует отметить, что большинство исследований с самозаклинивающимися структурами было выполнено математиками. По данной тематике практически отсутствуют публикации в области металлургии, машиностроении, строительстве. Начиная с 2019 года, в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова на базе лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жиляева была создана группа ученых, металлургов, специалистов в обработке металлов давлением, математиков, строителей для комплексного исследования возможности применения самозаклинивающихся структур в различных областях техники. За это время совместно с учеными из Австралии (Дискин А., Пастернак Е.) и МФТИ (Белов А.Я.) было подано семь заявок на изобретения РФ, на одну из которых получен патент на изобретение и еще на одну – решение о выдаче патента на изобретение.

Представляемые исследования являются продолжением ранее проведенной работы по компьютерному моделированию напряженного состояния самозаклинивающихся структур, состоящих из кубических элементов [14]. В продолжение ранее упомянутых исследований проводилось конечно-элементное моделирование нагружения многослойных самозаклинивающихся структур.

Моделирование и результаты

Модель двухслойной самозаклинивающейся структуры, состоящей из кубических элементов, представлена на **рис. 1**.

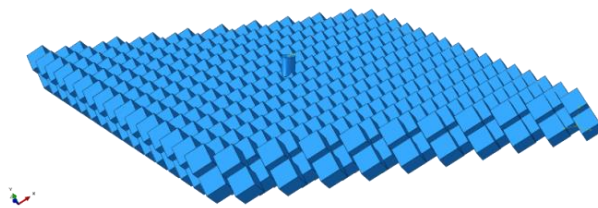


Рис. 1. Общий вид двухслойной самозаклинивающейся структуры с центральным точечным нагружением

Fig. 1. General view of the two-layer self-interlocking structure with central point loading

Результаты моделирования показали, что при точечном нагружении в центральную часть одного из слоев подобные структуры изменяют характер нагружения относительно случая с однослойной конструкцией. На **рис. 2** представлены поля результирующих перемещений в верхнем (слева) и нижнем (справа) слоях конструкции.

Как показали результаты моделирования, прикладываемая нагрузка в данном случае имеет разный характер распределения в каждом из слоев. Дело в том, что при подобной компоновке слоев каждый кубический элемент нагружаемого верхнего слоя начинает распределять прилагаемую нагрузку не только между соседствующими шестью элементами своего слоя, но и оказывает давление на три примыкающих элемента из нижеследующего слоя. Таким образом, многослойная конструкция из представленного примера может перераспределять вглубь себя даже точно приложенную в один элемент нагрузку.

Для первичной оценки потенциала увеличения количества слоев в подобного рода конструкциях была разработана десятислойная модель, каждый слой которой состоял из 320 одинаковых кубических элементов (**рис. 3**) и которая исследовалась при точечном нагружении в верхний слой (по аналогии с ранее упомянутой моделью), нагружении в девять равномерно распределенных по площади слоя точек и во всех случаях, но с нагружением с двух сторон конструкции.

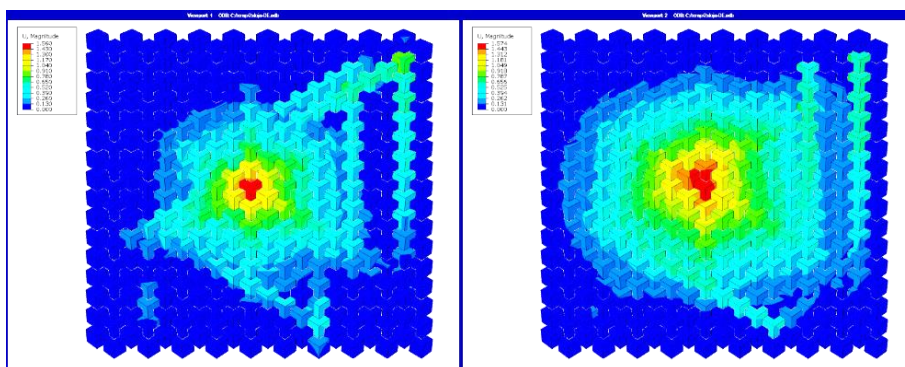


Рис. 2. Распределение результирующих смещений в двухслойной самозаклинивающейся структуре с центральным точечным нагружением

Fig. 2. Distribution of the resulting displacements in the two-layer self-interlocking structure with central point loading

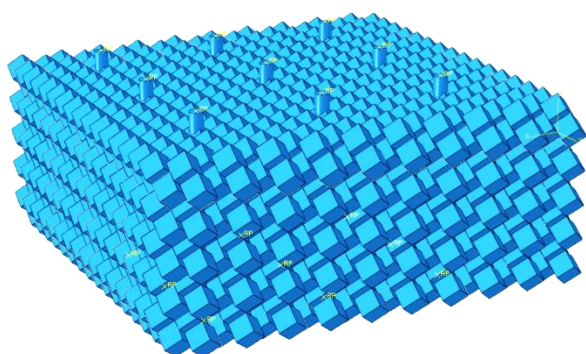


Рис. 3. Общий вид десятислойной самозаклинивающейся структуры
 Fig. 3. General view of the ten-layer self-interlocking structure

Анализ распределений напряжений Мизеса и результирующих смещений при центральном точечном нагружении верхнего слоя (рис. 4, 5) показал, что прикладываемая нагрузка плавно рассеивается в каждом из задействованных слоев конструкции с постепенным полным угасанием к нижнему слою. При этом результирующие смещения показывают, что центральные слои конструкции работают менее эффективно, чем слои периферийные. Это может быть объяснено тем, что кубические элементы центральных слоев ограничены в своём перемещении примерно одинаковым количеством слоев сверху и снизу, вследствие чего потенциал распределения нагрузки в них становится также лимитирован. Однако именно в центральных слоях рассматриваемой конструкции паттерн распределения напряжений максимально симметричен и напоминает ранее опубликованные результаты для однослойной самозаклинивающейся структуры.

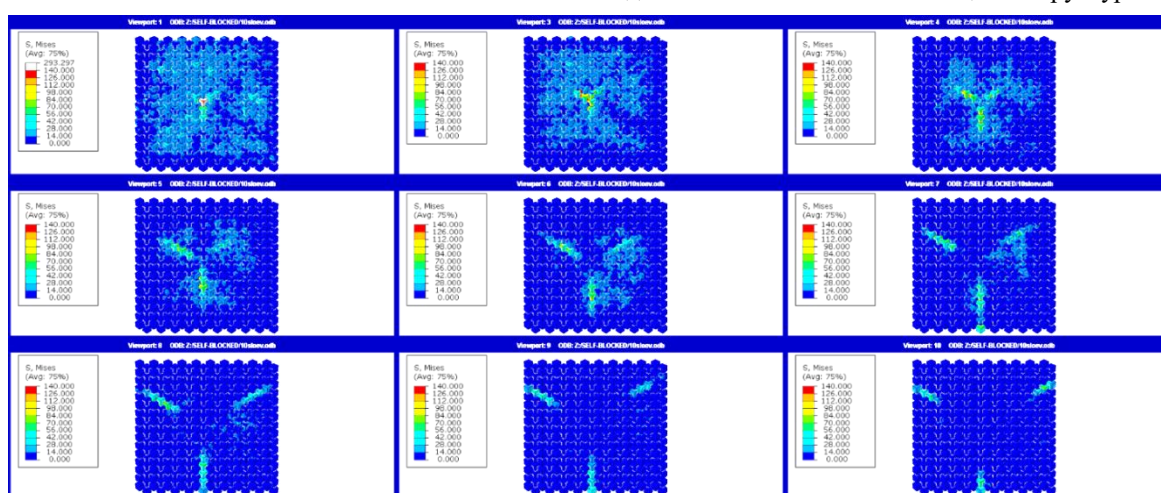


Рис. 4. Распределение напряжений Мизеса в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при центральном точечном нагружении верхнего слоя
 Fig. 4. Von Mises stress distribution in every layer of the ten-layer self-interlocking structure under central point loading of the upper layer

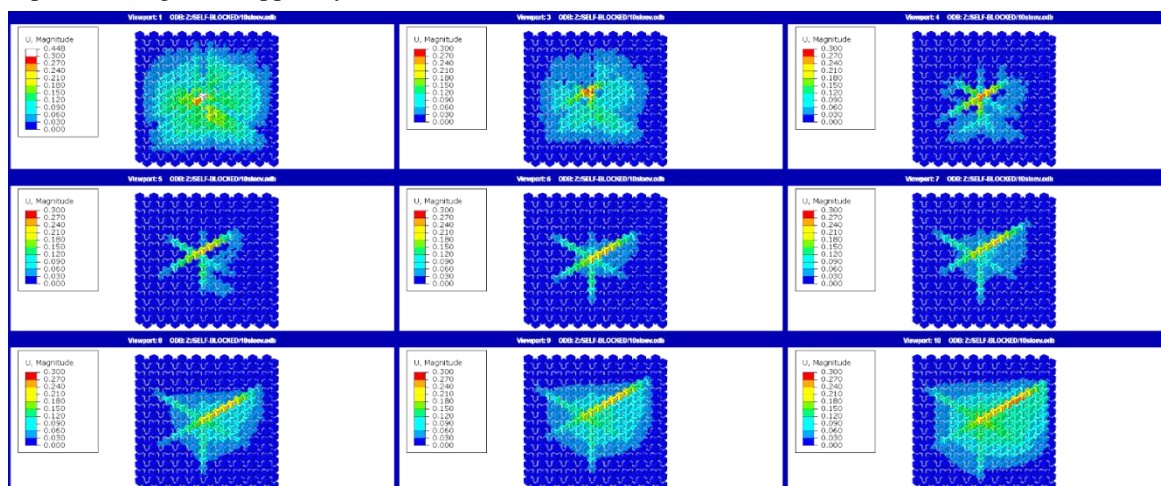


Рис. 5. Распределение результирующих смещений в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при центральном точечном нагружении верхнего слоя
 Fig. 5. Distribution of the resulting displacements in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under central point loading of the upper layer

Примечательно, что при более интенсивном 9-точечном нагружении верхнего слоя (рис. 6, 7) подобная тенденция по распределению нагрузки сохраняется, но становится ярче выраженной. Так, например, Y-подобный паттерн распределения нагрузки формируется в десятислойной конструкции уже с третьего слоя.

При прикладывании распределенной 9-точечной нагрузки на поверхность верхнего слоя (рис. 8, 9) исследуемая десятислойная конструкция из самозаклинивающихся структур максимально эффективно рассеивает нагрузку в своем объеме, минимально вовлекая в работу нижние периферийные слои. Из этого

может следовать вывод, что подобного рода конструкции отлично подходят для рассеивания распределенной по поверхности нагрузки, однако должны быть оценены с позиции рационального количества используемых слоев, так как при нагрузках определенной величины отдельные слои не будут вовлечены в работу, но приведут к росту общего веса или усложнению конструкции. Следовательно, в данном аспекте появляется теоретическая возможность применения либо более легких, либо более дешевых материалов, из которых изготовлены кубические элементы самозаклинивающейся структуры.

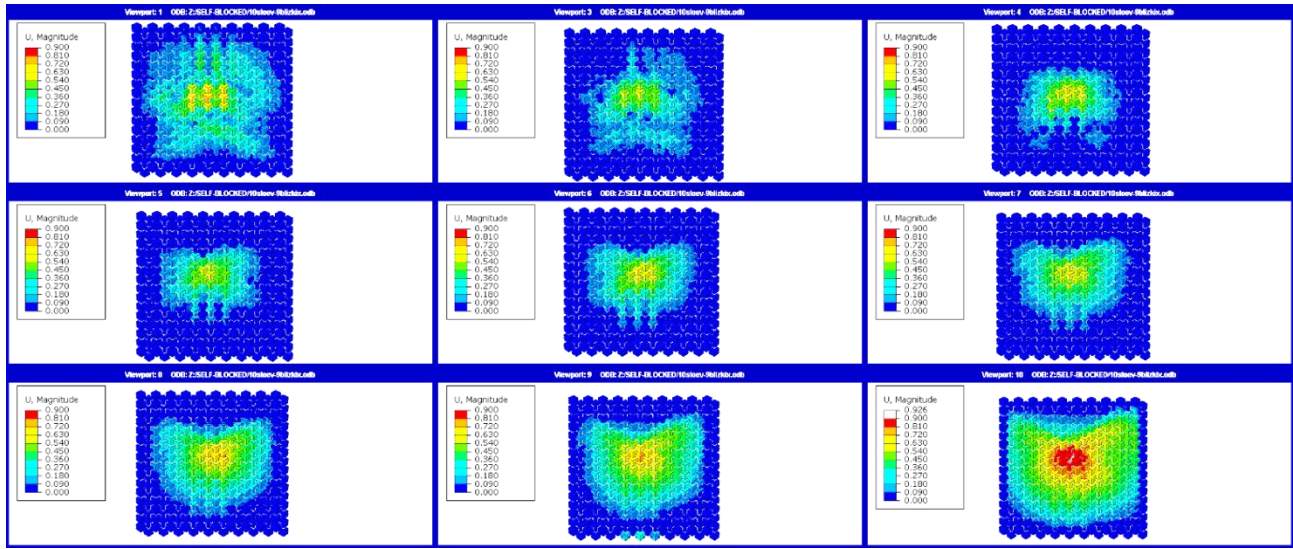


Рис. 6. Распределение результирующих смещений в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при центральном 9-точечном нагружении верхнего слоя

Fig. 6. Distribution of the resulting displacements in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under central 9-point loading of the upper layer

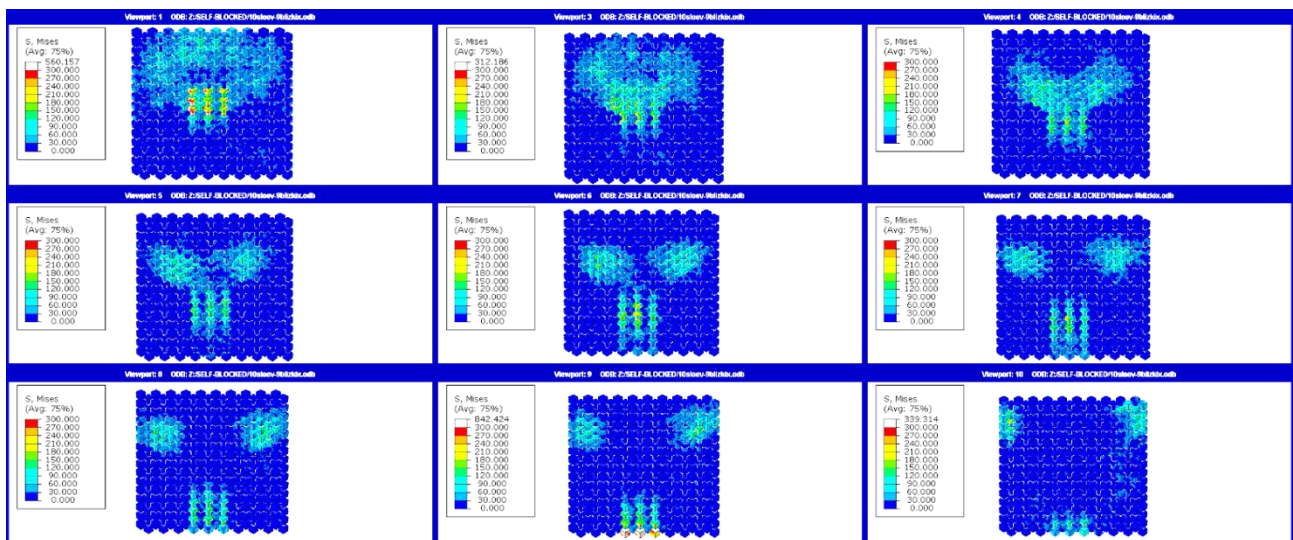


Рис. 7. Распределение напряжений Мизеса в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при центральном 9-точечном нагружении верхнего слоя

Fig. 7. Von Mises stress distribution in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under central 9-point loading of the upper layer

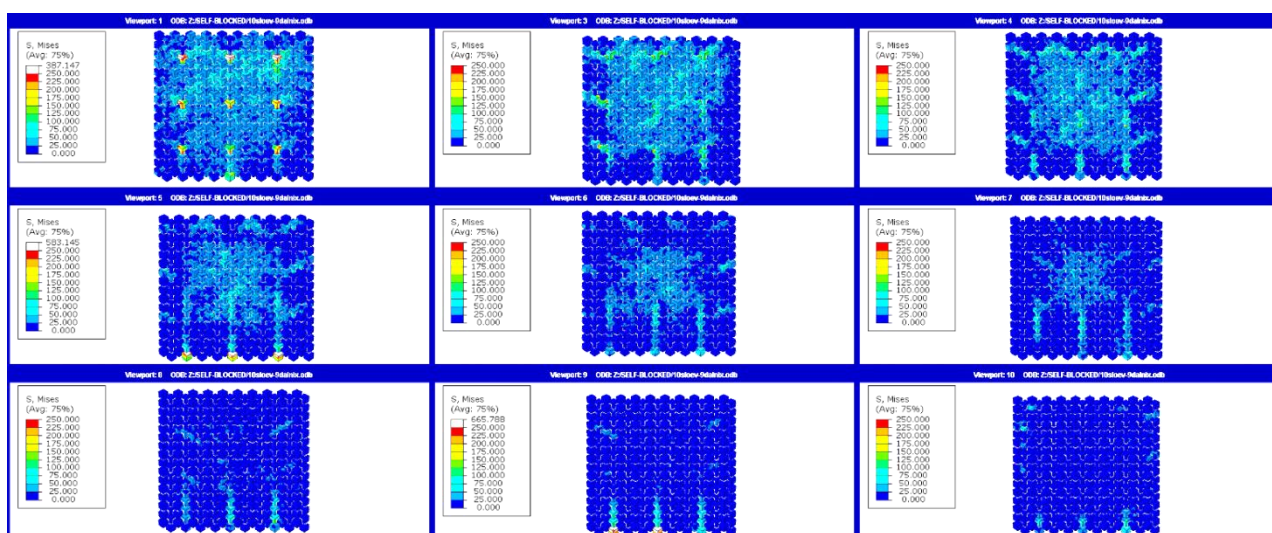


Рис. 8. Распределение напряжений Мизеса в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при распределенном 9-точечном нагружении верхнего слоя

Fig. 8. Von Mises stress distribution in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under distributed 9-point loading of the upper layer

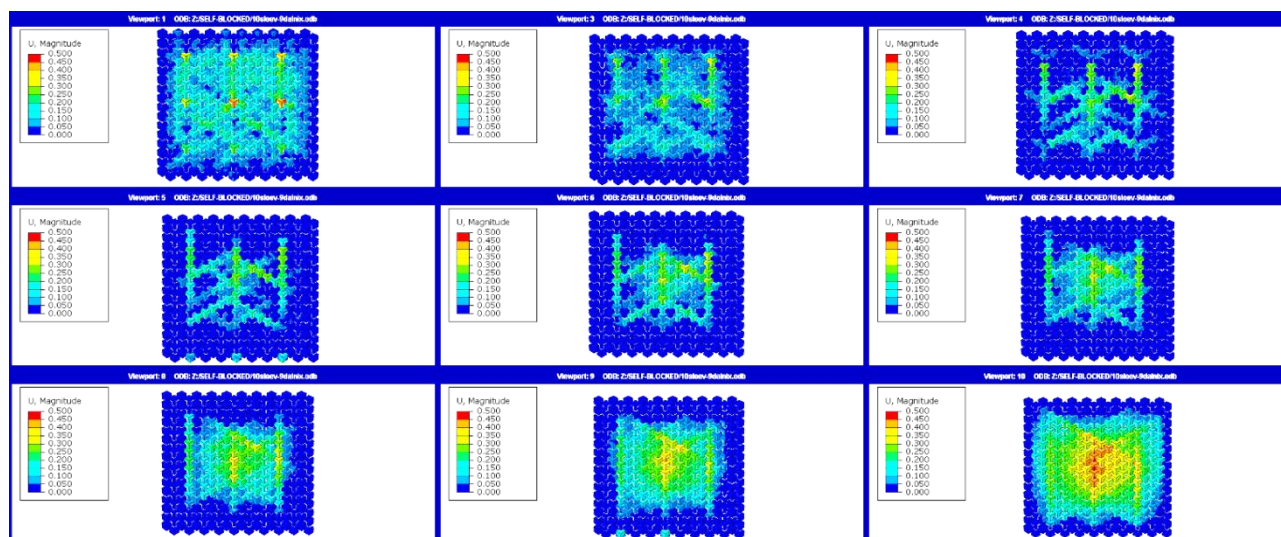


Рис. 9. Распределение результирующих смещений в каждом слое десятислойной самозаклинивающейся структуры при равномерном 9-точечном нагружении верхнего слоя

Fig. 9. Distribution of the resulting displacements in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under uniform 9-point loading of the upper layer

При исследовании аналогичного случая 9-точечного распределенного нагружения, но с двух сторон, наблюдалось, что напряженное состояние структуры становится максимально уравновешенным, так как распределяемые с нижних слоев напряжения начинают компенсировать аналогичную нагрузку с другой стороны (рис. 10).

Также дополнительно была смоделирована двухслойная самозаклинивающаяся структура, один из слоев которой имел кубические элементы размером в два раза меньше, чем у элементов первого слоя (рис. 11).

Моделирование показало, что, несмотря на очень

равномерное перераспределение точно приложенной нагрузки, устойчивость подобных конструкций требует дополнительного и более глубокого изучения, так как серьезно зависит от того, к какому слою эта нагрузка прикладывается.

Далее была смоделирована осадка алюминиевого параллелепипеда через сэндвич-панель, состоящую из усеченных кубических элементов (рис. 12).

Анализ следов контактного давления на панели и на заготовке показал, что на деформируемую заготовку падает практически в два раза меньшее давление, однако само пятно контакта больше и равномернее (рис. 13).

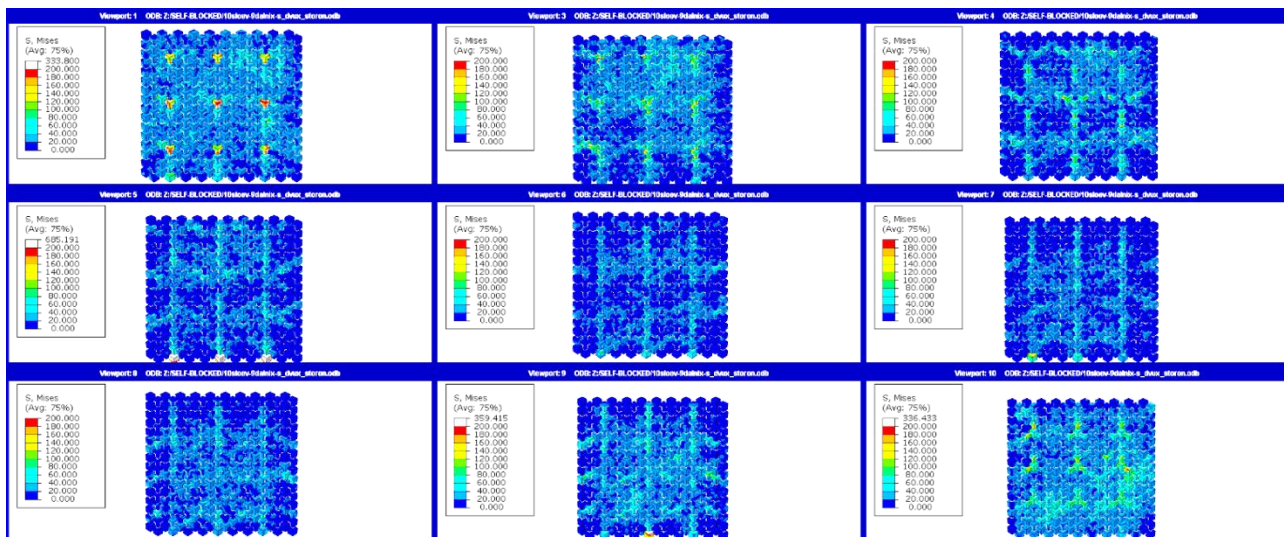


Рис. 10. Распределение напряжений Мизеса в каждом слое десятислойной самоаклинивающейся структуры при распределенном 9-точечном нагружении одновременно верхнего и нижнего слоев
 Fig. 10. Von Mises stress distribution in every layer of a ten-layer self-interlocking structure under distributed 9-point loading of the upper and lower layers at the same time

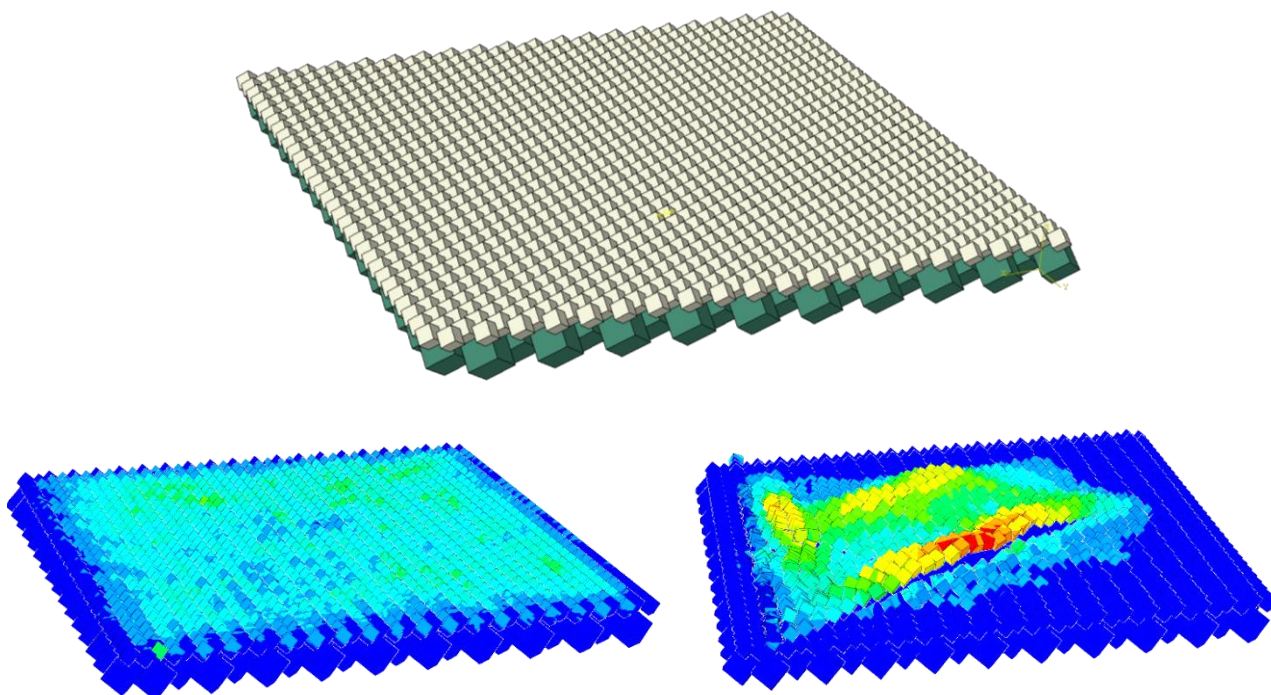


Рис. 11. Результаты моделирования двухслойной самоаклинивающейся структуры
 Fig. 11. Modeling results of a two-layer self-interlocking structure

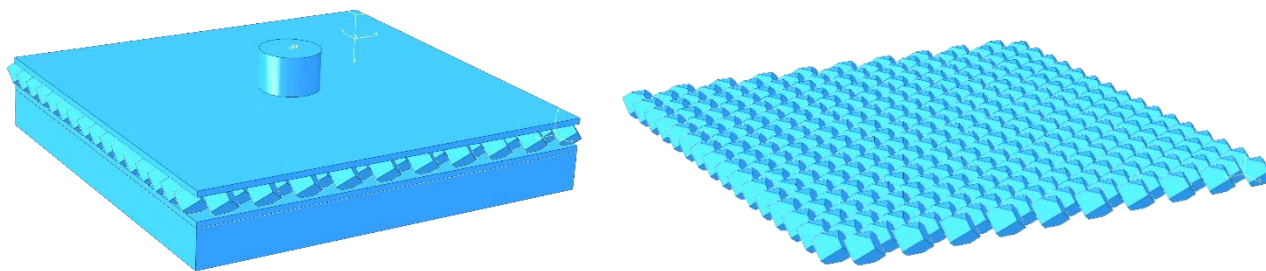


Рис. 12. Общий вид модели осадки посредством сэндвич-панели
Fig. 12. General view of the upsetting model using the sandwich panel

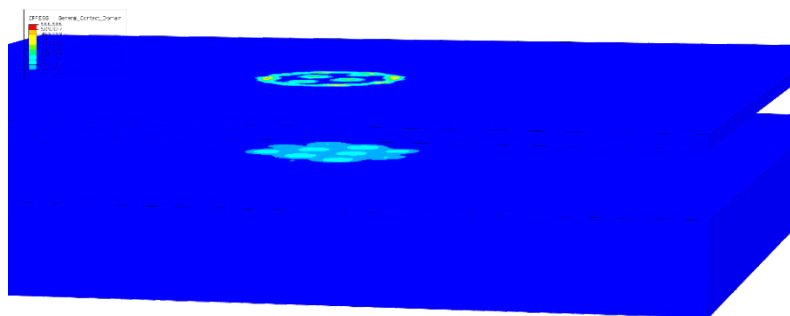


Рис. 13. Распределение контактных напряжений на осаживаемой через сэндвич-панель заготовке
Fig. 13. Distribution of contact stresses on the upset workpiece using the sandwich panel

Заключение

Полученные результаты наглядно демонстрируют богатый потенциал практического применения самозаклинивающихся структур с позиции их использования для гашения различного рода нагрузок в строительной или машиностроительной отраслях. Стоит отметить, что отдельным вопросом для дискуссий относительно применения подобных структур значится спектр используемых материалов, так как в самозаклинивающихся структурах в силу специфики их функционирования механические свойства материала часто не являются ограничивающим фактором. Следовательно, в зависимости от конкретного применения инженерам открывается большое количество вариаций применения облегченных, экономически доступных, экологических и других материалов. Продемонстрированное ранее достаточно эффективное перераспределение приложенной нагрузки в сочетании с легко подбираемым под условия эксплуатации форм фактором и элементарными составными элементами делает многослойные самозаклинивающиеся структуры в прикладном смысле достаточно легко масштабируемыми под конкретные задачи, а их потенциальную транспортировку, обслуживание, ремонт – относительно простыми.

При этом нельзя не отметить и ряд критичных моментов. В частности, вопросом отдельных углубленных исследований должна стать устойчивость данных структур в условиях предельных (или экстремальных) режимов эксплуатации. Несмотря на то, что эти конструкции могут быть многократно в

использовании или после ремонтов, до сих пор лимиты нагрузок, которые они могут таким образом гасить и перераспределять, достаточно не изучены. Затрудняется это, в свою очередь, междисциплинарным характером данной проблемы, зависящим как от конкретного случая применения, так и от частной вариации исполнения.

Список источников

1. Toughening by fragmentation – how topology helps / A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov, E. Pasternak // *Advanced Engineering Mater.* 2001, vol. 3, pp. 885-888.
2. Topological interlocking of platonic solids: A way to new materials and structures / A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov, E. Pasternak // *Phil. Mag. Lett.* 2003, vol. 83, pp. 197-203.
3. Fracture resistant structures based on topological interlocking with nonplanar contacts / A.V. Dyskin, Y. Estrin, E. Pasternak, H.C. Khor, A.J. Kanel-Belov // *Advanced Engineering Mater.* 2003, vol. 5, no. 3, pp. 116-119.
4. Канель-Белов А.Я. Самозаклинивающиеся структуры // *Квант. Физико-математический журнал для школьников и студентов.* 2009. Т. 1. С. 20-23.
5. The principle of topological interlocking in extraterrestrial construction / Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. // *Acta Astronautica.* 2005, vol. 57, no. 1, pp. 10-21.
6. Topological interlocking of protective tiles for Space Shuttle / Y. Estrin, A.V. Dyskin, E. Pasternak, H.C. Khor,

- A.J. Kanel-Belov // *Phil. Mag. Letters*. 2003, vol. 83, pp. 351-355.
7. Interlocking properties of buckyballs / A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov, E. Pasternak // *Physics Letters A*. 2003, vol. 319, pp. 373-378.
 8. Deformation mechanics of non-planar topologically interlocked assemblies with structural hierarchy and varying geometry / L. Djumas, G.P. Simon, Y. Estrin et al. // *Scientific Reports*. 2017, vol. 7, no. 1, 11844. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12147-3>
 9. Transverse loading of cellular topologically interlocked materials / S. Khandelwal, T. Siegmund, R.J. Cipra, J.S. Bolton // *Int. J. Solids Struct.* 2012, vol. 49, no. 18, pp. 2394-2403.
 10. Adaptive mechanical properties of topologically interlocking material systems / S. Khandelwal, R.J. Cipra, J.S. Bolton, T. Siegmund // *Smart Mater. Struct.* 2015, vol. 24, no. 4, 045037.
 11. Impact mechanics of topologically interlocked material assemblies / Y. Feng, T. Siegmund, E. Habtour, J. Riddick // *Intl. J. Impact Eng.* 2015, vol. 75, pp. 140-149.
 12. Manufacture and mechanics of topologically interlocked material assemblies / T. Siegmund, F. Barthelat, R.J. Cipra, Ed. Habtour, J. Riddick // *Applied Mechanics Reviews*. 2016, vol. 68, no. 4, 041401-1.
 13. Mather A., Cipra R.J., Siegmund T. Structural integrity during remanufacture of a topologically interlocked material // *Int. J. Struct. Integr.* 2012, vol. 3, no. 1, pp. 61-78.
 14. Применение самозаклинивающихся структур: демонстрация концепции на основе КЭ-моделирования / Константинов Д.В., Матвеев С.В., Песин А.М., Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023. Т. 21. №1. С. 93-99. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99
 4. Kanel-Belov A.J. Interlocking structures. *Kvant. Fiziko-matematicheskii zhurnal dlya shkolnikov i studentov* [Quantum. Journal of Physics and Mathematics for School and University Students]. 2009;1:20-23. (In Russ.)
 5. Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. The principle of topological interlocking in extraterrestrial construction. *Acta Astronautica*. 2005;57(1):10-21.
 6. Estrin Y., Dyskin A.V., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. Topological interlocking of protective tiles for Space Shuttle. *Phil. Mag. Letters*. 2003;83:351-355.
 7. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. Interlocking properties of buckyballs. *Physics Letters A*. 2003;319:373-378.
 8. Djumas L., Simon G.P., Estrin Y. et al. Deformation mechanics of non-planar topologically interlocked assemblies with structural hierarchy and varying geometry. *Scientific Reports*. 2017;7(1):11844. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12147-3>.
 9. Khandelwal S., Siegmund T., Cipra R.J., Bolton J.S. Transverse loading of cellular topologically interlocked materials. *Int. J. Solids Struct.* 2012;49(18):2394-2403.
 10. Khandelwal S., Cipra R.J., Bolton J.S., Siegmund T. Adaptive mechanical properties of topologically interlocking material systems. *Smart Mater. Struct.* 2015;24(4):045037.
 11. Feng Y., Siegmund T., Habtour E., Riddick J. Impact mechanics of topologically interlocked material assemblies. *Intl. J. Impact Eng.* 2015;75:140-149.
 12. Siegmund T., Barthelat F., Cipra R.J., Habtour E., Riddick J. Manufacture and mechanics of topologically interlocked material assemblies. *Applied Mechanics Reviews*. 2016;68(4):040803.
 13. Mather A., Cipra R.J., Siegmund T. Structural integrity during remanufacture of a topologically interlocked material. *Int. J. Struct. Integr.* 2012;3(1):61-78.
 14. Konstantinov D.V., Matveev S.V., Pesin A.M., Korchunov A.G., Pivovarova K.G. Application of interlocking structures: FEM-based concept demonstration. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):93-99. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99>

References

1. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. Toughening by fragmentation – how topology helps. *Advanced Engineering Mater.* 2001;3:885-888.
2. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. Topological interlocking of platonic solids: A way to new materials and structures. *Phil. Mag. Lett.* 2003;83:197-203.
3. Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. Fracture resistant structures based on topological interlocking with nonplanar contacts. *Advanced Engineering Mater.* 2003;5(3):116-119.

Поступила 09.11.2023; принята к публикации 23.01.2024; опубликована 28.03.2024
Submitted 09/11/2023; revised 23/01/2024; published 28/03/2024

Константинов Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Пивоварова Ксения Григорьевна – доктор технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: kgpivovarova@gmail.com.

Dmitrii V. Konstantinov – PhD (Eng.), researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Aleksandr M. Pesin – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Kseniia G. Pivovarova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: kgpivovarova@gmail.com.