



ПРИМЕНЕНИЕ САМОЗАКЛИНИВАЮЩИХСЯ СТРУКТУР: ДЕМОНСТРАЦИЯ КОНЦЕПЦИИ НА ОСНОВЕ КЭ-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Константинов Д.В.¹, Матвеев С.В.², Песин А.М.¹, Корчунов А.Г.¹, Пивоварова К.Г.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Современное развитие техники предъявляет все большие требования к повышению жесткости и надежности функционирования материалов и конструкций. Традиционно это достигается созданием новых химических составов используемых материалов и методов их обработки. В настоящей работе на основе компьютерного конечно-элементного моделирования демонстрируется еще один эффективный метод повышения жесткости и надежности материалов и конструкций за счет подбора рациональной геометрии элементов структуры и условий их взаимодействия друг с другом. Такие структуры были впервые предложены математиками и получили название самозаклинивающихся. Самозаклинивающаяся структура – это набор выпуклых тел, такой, что любое бесконечно малое движение одного из них возможно лишь как часть совместного движения всех тел вместе (как единого твердого тела). Моделирование производилось в программном комплексе Abaqus с целью демонстрации концептуального подхода к использованию самозаклинивающихся структур в области разработки конструктивных материалов различного назначения. На основе результатов моделирования изучены различные паттерны распределения нагрузки в подобных системах, с помощью которых выдвинуты теории о их применении в будущих исследованиях. Было установлено, что в зависимости от различных сценариев нагружения подобные структуры могут рассеивать приложенные точечные нагрузки по всему объему конструкционного элемента. Также продемонстрирован потенциал оптимизации геометрии отдельных элементов самозаклинивающихся структур, позволяющий расширить их эксплуатационные свойства с сохранением ключевых особенностей. Научно обосновано будущее применение подобных структур для перераспределения нагрузок как в конструкционных материалах, так и в широком спектре инструментов.

Ключевые слова: самозаклинивающиеся структуры, жесткость, надежность функционирования, новые материалы, конструкции, конечно-элементное моделирование, перераспределение напряжений

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., Матвеев С.В., Песин А.М., Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г., 2023

Для цитирования

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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99>



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

APPLICATION OF INTERLOCKING STRUCTURES: FEM-BASED CONCEPT DEMONSTRATION

Konstantinov D.V.¹, Matveev S.V.², Pesin A.M.¹, Korchunov A.G.¹, Pivovarova K.G.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Modern development of machines demands increased hardness and reliability of materials and structures. Usually, this is done by introducing new chemical compositions of materials and new methods of material treatment. Following the computer finite element modeling, this paper demonstrates another efficient method of increasing hardness and reliability of materials and structures by selecting the reasonable geometry of structure elements and conditions of their interactions. These geometrical structures, first introduced by mathematicians, are called interlocking. An interlocking structure is a set of convex bodies arranged so that any infinitely small movement of one of them is possible only as a part of a simultaneous movement by all bodies (as if they were a single body). Modeling was carried out in the Abaqus software complex to demonstrate a conceptual approach to the use of interlocking structures in the development of structural materials for various purposes. Using the simulation results, the authors have studied various patterns of load distribution in such systems and put forward theories about their application in future studies. It was found that depending on various loading scenarios, such structures can dispel the applied point loads along the entire volume of the structural element. The paper also demonstrates the potential for optimizing the geometry of individual elements of interlocking structures, contributing to expanding their operational properties, while maintaining key features. The authors provide a scientific rationale for applying such structures in future to redistribute loads both in structural materials and in a wide range of tools.

Keywords: interlocking structures, hardness, operational reliability, new materials, structures, finite element modeling, stress redistribution

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., 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, vol. 21, no. 1, pp. 93-99. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-93-99>

Введение

Современное развитие техники предъявляет все большие требования к повышению жесткости и надежности функционирования материалов и конструкций. Традиционно это достигается созданием новых химических составов используемых материалов и разработкой надежных методов их обработки. В настоящей работе предлагается еще один эффективный метод повышения жесткости и надежности материалов и конструкций за счет подбора рациональной геометрии элементов структуры и условий их взаимодействия друг с другом. Такие структуры были впервые предложены математиками и получили название самозаклинивающихся.

Самозаклинивающаяся структура – это набор выпуклых тел, такой, что любое бесконечно малое движение одного из них возможно лишь как часть совместного движения всех тел вместе (как единого твердого тела). Имеющиеся структуры базируются на рассмотрении слоев из кубов, тетраэ-

ров и октаэдров и других объемных тел. История открытия самозаклинивающихся структур, а также их примеры и приложения широко опубликованы в работах [1-3]. Данная тема получила известность как в области чистой 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]. Данные структуры обладают главной 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, машиностроения, строительстве. Начиная с 2019 года, в Магнитогорском государ-

ственном техническом университете им. Г.И. Носова на базе лаборатории механики градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева 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 [9-15].

Материалы и методы исследования

Для представляемого исследования была разработана компьютерная модель самозаклинивающейся структуры, состоящей из кубических элементов (рис. 1).

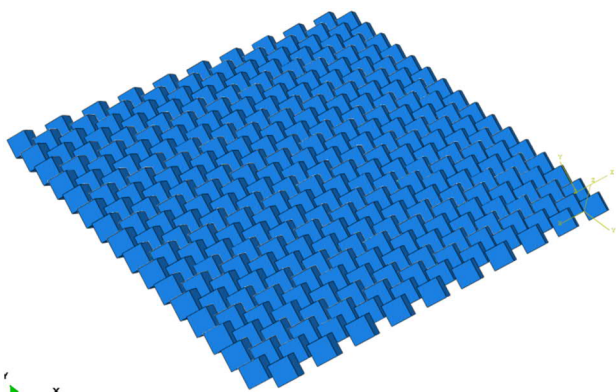


Рис. 1. Общий вид конечно-элементной модели
Fig. 1. General view of the FEM model

Кубические элементы располагались в пространстве таким образом, чтобы сечения каждого куба, в которых образуется правильный шестиугольник, лежали в одной плоскости, а сами кубы соприкасались. Также, согласно граничным условиям, боковые ребра крайних кубов жестко фиксировались в пространстве с целью стабилизации всей структуры. Между поверхностями кубов использовался контакт типа General Contact. Модель засеивалась кубическими элементами (общее количество элементов – 69 120). В качестве материала была выбрана сталь марки 80, при этом это не имело принципиального значения с позиции исследования, так как главной целью была именно демонстрация эффектов перераспределения напряжений при различных шаблонах нагружения.

Для исследования напряженного состояния в вершины кубов давалась концентрированная си-

ла, направленная строго перпендикулярно плоскости, в которой находились шестигранные сечения всех кубов.

Полученные результаты и их обсуждение

В работе исследовались различные сценарии нагружения смоделированной структуры. Для каждого случая представлены три момента нагружения с целью продемонстрировать динамику распределения напряжений в структуре.

При осуществлении давления на вершину центрального куба начинается процесс распределения напряжений во всех близлежащих компонентах структуры (рис. 2). Далее в ходе роста давления начинает формироваться ярковыраженная направленность распределения нагрузки в стороны углов структуры. При этом примечательно, что в указанных направлениях уровень напряжения Мизеса в каждом последующем кубе снижается в абсолютных величинах примерно на 10-15%, а условные направления на 4, 8 и 12 часов остаются практически незадействованы.

При увеличении количества точек нагружения до двух (рис. 3) паттерн рассеивания нагрузки изменяется. Высокие напряжения получают в своих вершинах кубы, которые находятся на пересечении «рассеивающих» направлений каждого из нагружаемых элементов. Стоит отметить, что особенно ярко данный факт наблюдается в области между нагружаемыми кубами.

При несколько измененной задаче с раздвинутыми точками нагружения самозаклинивающейся структуры (рис. 4) ранее описанный эффект наблюдается менее выражено. Напряжения Мизеса в данном случае рассеиваются по структуре более равномерно.

В случае дальнейшего увеличения числа точек нагружения (рис. 5) упомянутый во второй модели тренд демонстрируется более наглядно. Кубы, находящиеся внутри периметра, очерченного нагруженными элементами, испытывают максимальные значения напряжений, которые в определенный момент практически сравниваются по абсолютным значениям с нагружаемыми.

Увеличение точек приложения давления до девяти (рис. 6) наглядно показало, что элементы структуры, находящиеся в ее углах, практически не распределяют нагрузку на соседние кубы. Более того, концентрирование всех девяти нагружаемых элементов вблизи друг относительно друга в симуляции приводит к нарушению целостности структуры в целом.

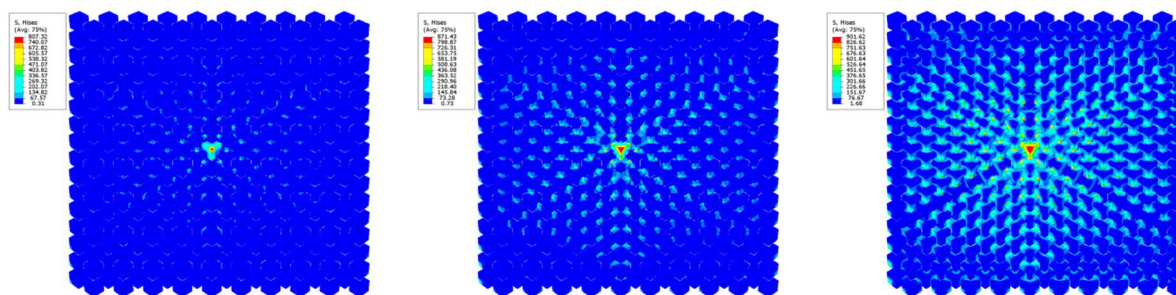


Рис. 2. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в единственной центральной точке

Fig. 2. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in one central point

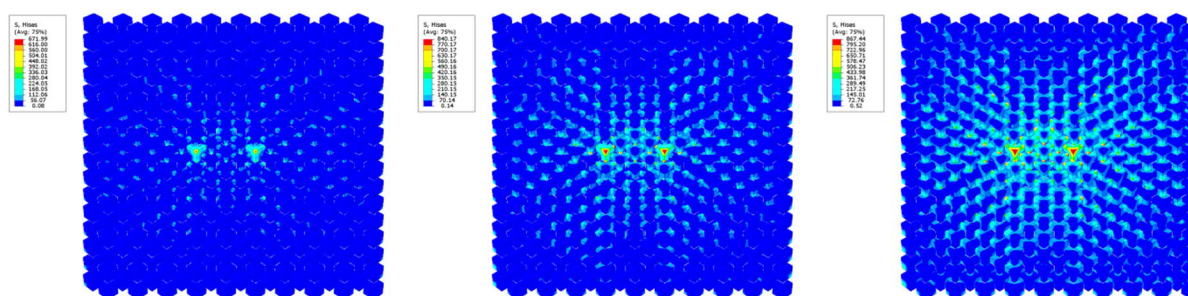


Рис. 3. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в двух соседствующих точках

Fig. 3. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in two neighboring points

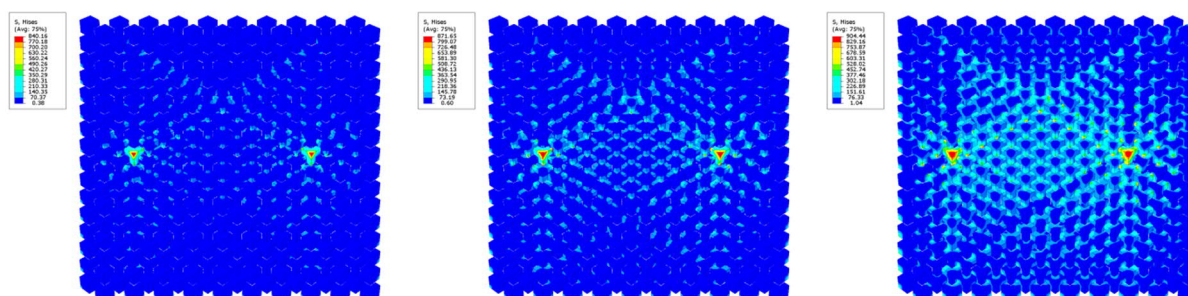


Рис. 4. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в двух удаленных точках

Fig. 4. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in two remote points

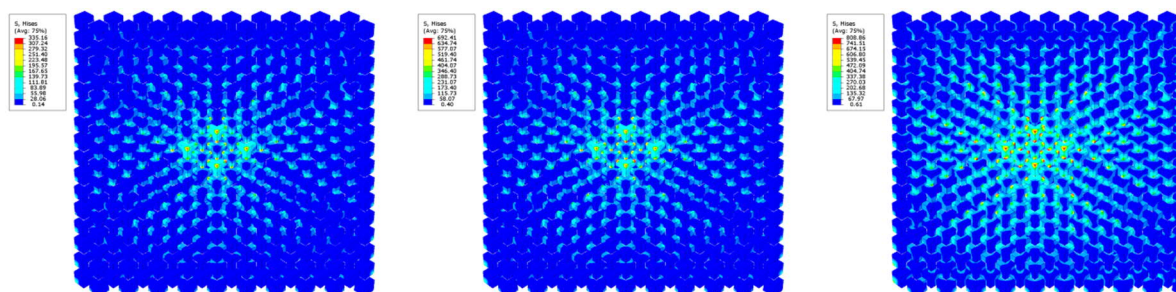


Рис. 5. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в четырех соседствующих точках

Fig. 5. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in four neighboring points

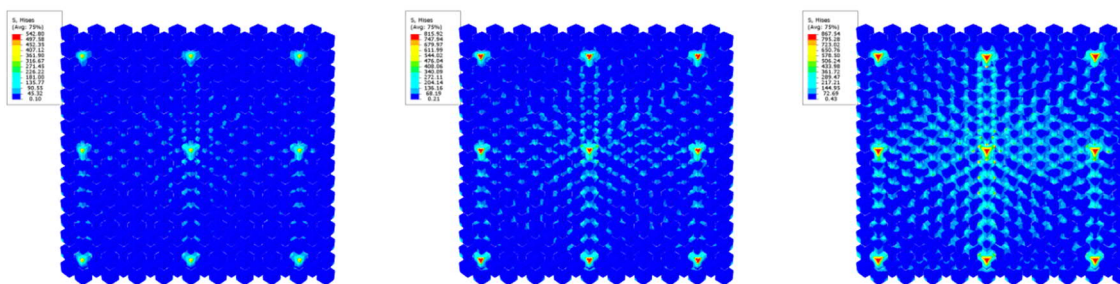


Рис. 6. Динамика перераспределения напряжений Мизеса в самозаклинивающейся структуре при нагружении в девяти равноудаленных точках

Fig. 6. Dynamics of the von Mises stress redistribution in the interlocking structure, when loading in nine equally spaced points

Отдельно стоит отметить, применимость данных эффектов для производства не только строительных материалов (в том числе для сложно прогнозируемых условий эксплуатации), но различного рода технологического инструмента. Например, исследованная в статье структура в вариации с усеченной поверхностью (рис. 7) может быть применена в области производства различного рода сэндвич-панелей с целью перераспределения локальных нагрузок по большой площади конструктивного элемента. Также дополнительно следует исследовать вопрос многослойной работы подобных структур.

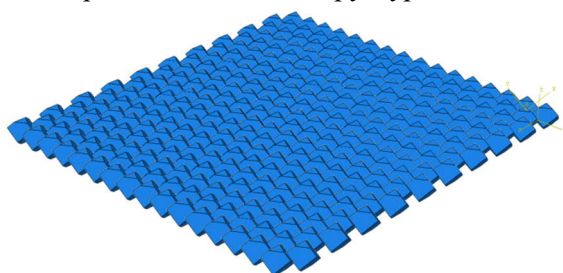


Рис. 7. Вариация самозаклинивающейся структуры для использования в сэндвич-панелях

Fig. 7. The interlocking structure used in sandwich panels (for reference)

С целью получения своего рода фильтрующих свойств также может быть применена вариация структуры с оптимизированной топологией куба (рис. 8).

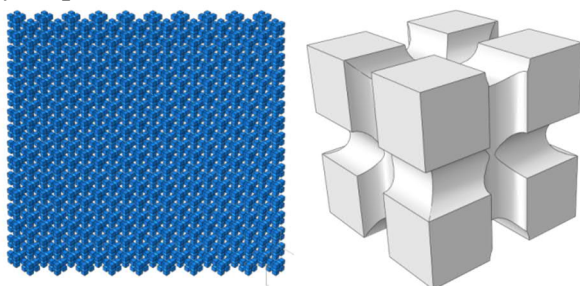


Рис. 8. Вариация самозаклинивающейся структуры для использования в геотекстиле

Fig. 8. The interlocking structure used in geotextile (for reference)

Подобная вариация может успешно использоваться в различного рода геобарьерах для одновременного перераспределения нагрузки и отфильтровывания, например, вод.

Заключение

На основе компьютерного моделирования продемонстрирован широкий потенциал самозаклинивающихся структур в области перераспределения разгрузок, что имеет важное значение для отраслей ответственного строительства, автомобиле- и машиностроения. В целом полученные результаты служат заделом для дальнейшего прикладного использования самозаклинивающихся структур в строительной отрасли и исследования их возможностей и ограничений.

Список источников

1. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J. and Pasternak E. Toughening by fragmentation – how topology helps // *Advanced Engineering Mater.* 2001, vol. 3, pp. 885-888.
2. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J. and Pasternak E. Topological interlocking of platonic solids: A way to new materials and structures // *Phil. Mag. Lett.* 2003, vol. 83, pp. 197-203.
3. Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Khor H.C. and Kanel-Belov A.J. Fracture resistant structures based on topological interlocking with nonplanar contacts // *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. 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, vol. 57, no. 1, pp. 10-21.
6. Estrin Y., Dyskin A.V., Pasternak E., Khor H.C. and Kanel-Belov A.J. Topological interlocking of protective tiles for Space Shuttle // *Phil. Mag. Letters.* 2003, vol. 83, pp. 351-355.
7. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J. and Pasternak E. Interlocking properties of buckyballs // *Physics Letters A.* 2003, vol. 319, pp. 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, vol. 7, no. 1, 11844. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12147-3>
9. Заявка № 2021126274 РФ. 07.09.2021. Стыковое соединение железобетонного перекрытия с колонной / Кришан А.Л., Песин А.М., Белов А.Я., Пастернак Е., Локотунина Н.М., Сагадатов А.И.
10. Пат. 2756086 РФ. МПК В32В7/02. Способ получения слоистого биметалла сталь-алюминиевый сплав / Песин А.М., Белов А.Я., Дискин А.В., Тулупов О.Н., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М., Бирюкова О.Д.; патентообладатель Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. № 2021103956, заявл. 16.02.2021; опубл. 27.01.2021. Бюл. № 27.
11. Заявка на изобретение № 2021101410, 22.01.2021. Способ получения слоистого проката / Песин А.М., Белов А.Я., Пастернак Е., Белов В.К., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М., Бирюкова О.Д., Кожемякина А.Е.
12. Заявка на изобретение № 2021106748, 15.03.2021. Способ производства биметаллической проволоки / Песин А.М., Харитонов В.А., Белов А.Я., Пастернак Е., Тулупов О.Н., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М.
13. Заявка на изобретение № 2021110188, 12.04.2021. Волока / Песин А.М., Харитонов В.А., Тулупов О.Н., Белов А.Я., Дискин А.В., Пустовойтов Д.О., Локотунина Н.М.
14. Заявка на изобретение № 2021110189, 12.04.2021. Составная волока / Песин А.М., Харитонов В.А., Корчунов А.Г., Белов А.Я., Пастернак Е., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г. Решение о выдаче патента от 06.10.2021 г.
15. Заявка на изобретение № 2021113061, 04.05.2021. Роликовая волока / Песин А. М., Харитонов В.А., Белов А. Я., Дискин А.В., Барышников М.П., Пустовойтов Д.О., Извекков Ю.А., Носов Л.В., Песин И.А.
- on topological interlocking with nonplanar contacts. *Advanced Engineering Mater.* 2003;5(3):116-119.
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. Krishan A.L., Pesin A.M., Belov A.Ya., Pasternak E., Lokotunina N.M., Sagadotov A.I. A butt joint of the reinforced concrete floor and the column. RU2021126274 (Application) 2021.
10. Pesin A.M., Belov A.Ya., Diskin A.V., Tulupov O.N., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukova O.D. Method of producing the bimetallic layered steel-aluminum alloy composites. RU2756086 (Patent) 2021.
11. Pesin A.M., Belov A.Ya., Pasternak E., Belov V.K., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Method of producing layered rolled products. RU2021101410 (Application for an invention) 2021.
12. Pesin A.M., Kharitonov V.A., Belov A.Ya., Pasternak E., Tulupov O.N., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M. Method of producing bimetallic wire. RU2021106748 (Application for an invention) 2021.
13. Pesin A.M., Kharitonov V.A., Tulupov O.N., Belov A.Ya., Diskin A.V., Pustovoytov D.O., Lokotunina N.M. Drawing die. RU2021110188 (Application for an invention) 2021.
14. Pesin A.M., Kharitonov V.A., Korchunov A.G., Belov A.Ya., Pasternak E., Pustovoytov D.O., Pivovarova K.G. Split die. RU2021110189 (Application for an invention) 2021.
15. Pesin A.M., Kharitonov V.A., Belov A.Ya., Diskin A.V., Baryshnikov M.P., Pustovoytov D.O., Izvekov Yu.A., Nosov L.V., Pesin I.A. Roller die. RU2021113061 (Application for an invention) 2021.

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

Поступила 12.12.2022; принята к публикации 06.03.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 12/12/2022; revised 06/03/2023; published 27/03/2023

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

Матвеев Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.

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

Корчунов Алексей Георгиевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. ORCID 0000-0002-2844-8283

Пивоварова Ксения Григорьевна – доктор технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

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

Sergei V. Matveev – DrSc (Physics and Mathematics), Professor, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia.

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

Aleksey G. Korchunov – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID 0000-0002-2844-8283

Kseniya G. Pivovarova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.