

**ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ОТКЛИКА СОТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ
С ТОНКИМИ ОБШИВКАМИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

© 2023 И.Е. Адеянов, М.Ю. Александрова

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.03.2023

Использование сотовых сэндвич-панелей в народном хозяйстве получило широкое распространение в последнее время. Их преимуществами является относительная легкость наряду с хорошими прочностными характеристиками. В статье приводится расчет ударного процесса взаимодействия сотовой сэндвич-панели и абсолютно твердого шаровидного тела. Определяются величины внутренней и кинетической энергии, а так же эквивалентных напряжений в сэндвич-панели. Анализируется влияние материалов тонких обшивок сэндвич-панели на получаемые величины. Задача решается с помощью компьютерного моделирования динамического процесса в явной постановке. Результаты работы актуальны при проектировании конструкций, сочетающих в себе оптимальные прочностные и весовые характеристики.

Ключевые слова: сэндвич-панель, сотовый наполнитель, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, динамическая задача, внутренняя энергия.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-203-208

EDN: DYQFMF

К ударопрочным конструкциям часто предъявляется требование необходимости снижения их веса. Решением данной проблемы является внедрение облегченных конструкций с высокой способностью поглощения энергии.

Сотовые структуры с тонкими обшивками обладают относительно высокой способностью к поглощению энергии в сочетании с хорошими прочностными характеристиками и низкой плотностью. Особенно высоко поглощение энергии, когда нагрузка прикладывается к обшивке. По этой причине сотовые сэндвич-панели могут успешно применяться в энергопоглощающих устройствах.

Применение сотовых структур в инженерных задачах получило значительное развитие, начиная с 80-х годов XX века. Они используются в авиационно-космической отрасли, автомобильной промышленности, строительных конструкциях и для многих других прикладных инженерных задач.

Механизм поглощения удара двухслойных сотовых сэндвич-панелей оценивали в работе [1] в зависимости от размера ячеек. Соты с большим размером ячеек показывали лучшее распределение ударной нагрузки. Такие наблюдения указывают на возможность получения устройств поглощения энергии с контролируемой деформацией.

В работе [2] авторами предложен вращающийся стержень Гопкинсона для исследования поведения ячеистых материалов при ударном сдвиге и сжатии. С помощью этой конструкции реакции на сдвиг-сжатие сотовой структуры исследовались при различных углах нагрузки и сравнивались с соответствующими результатами квазистатического расчета. Результаты эксперимента показали, что нормальная прочность сотового наполнителя снижается, а прочность на сдвиг становится более существенной с увеличением компонента деформации сдвига. Деформация сот при комбинированном сдвиге-сжатии исследовались при различных исходных параметрах, таких как размеры образца, условия контакта и геометрические особенности образца.

Низкоскоростную реакцию на ударный отклик алюминиевых сотовых конструкций с листами из армированного углеродным волокном пластика исследовали в работе [3] путем эксперимента и численными методами. Чтобы дополнительно прояснить поведение при ударе, была разработана пользовательская подпрограмма VUMAT для прогнозирования постепенного разрушения композитных облицовочных листов. Авторы проводили оценку влияния параметров конструкции, таких как толщина лицевого листа, толщина стенки ячейки, высота сотового наполнителя и длина стороны шестигранника, на ударную нагрузку, поглощение энергии и вид разрушения. Результаты исследования показали, что значительное влияние на характеристики ударопрочности сотовых конструкций оказывает толщина лицевого листа. Толщина

Адеянов Игорь Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механики.

E-mail: adigorev@gmail.com

Александрова Маргарита Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики.

E-mail: kris-maks@mail.ru

стенки ячейки и длина стороны сотового заполнителя оказывают заметное влияние на ударную нагрузку и конструктивную жесткость таких конструкций, но не играют большой роли в поглощении энергии.

Целью настоящей работы является исследование ударного отклика сотовой структуры на высокоскоростной удар абсолютно твердым телом сферической формы, сравнение величины поглощения энергии конструкцией с различными материалами тонких обшивок.

Задача рассматривается как динамическая в явной постановке, решаемая методом конечных элементов. Величина шага в этом случае зависит от времени, которое необходимо, чтобы информация передавалась от одного края элемента до другого. Одной из отличительных особенностей динамического анализа в явной постановке является сравнительно небольшой размер временного шага. Он зависит от размера наименьшего элемента модели, а так же от жесткости и плотности материала тела. Величина шага Δt определяется с помощью критерия Куранта-Фридрихса-Леви. Для обеспечения правильности решения должно выполняться условие

$$\Delta t \leq f \cdot \left[\frac{h}{c} \right]_{min},$$

где f – коэффициент запаса временного шага, h – средний линейный размер элемента, c – скорость звука.

Преимуществом динамического анализа в явной постановке является то, что процесс решения не требует сходимости на каждом шаге. При неявной постановке могут возникнуть проблемы со сходимостью в случае больших деформаций. Поэтому ударные взаимодействия целесообразно решать в неявной постановке.

Рассматриваемая нами задача решается методом конечных элементов в модуле неявного динамического анализа пакета ANSYS Workbench.

Твердотельная модель сэндвич-панели представляет собой сотовый наполнитель (рис. 1, а) с габаритными размерами $36 \times 28 \times 18$ мм с шестиугольными ячейками, который расположен между двух тонких обшивок.

Шестиугольные ячейки сот имеют следующие геометрические параметры (рис. 1, б): высота ячейки 3,5 мм, ширина стороны ячейки 3,5 мм, угол наклона стороны ячейки 60° , толщина ячеек $6,8 \cdot 10^{-5}$ мм. Толщина обшивок – 1,5 мм. Диаметр абсолютно твердого шарика, с помощью которого производится удар по сэндвич-панели по направлению, соответствующему нормали к плоскости обшивки, выбирается равным 8 мм.

Конечно-элементная модель сэндвич-панели и шарика представлена на рис. 2. Разбиение сот производится регулярной сеткой, состоящей из прямоугольных оболочечных элементов. В качестве материала сотового наполнителя выбрана алюминиевая фольга. Этот материал широко используется с этой целью во многих отраслях народного хозяйства. Разбиение обшивок производится шестигранниками. В качестве материала обшивок выбран ряд материалов для различных вариантов расчета, механические константы которых приведены в табл. 1. Шарик разбит тетраэдрами. Материал шарика не имеет значения, т.к. он рассматривается как абсолютно твердое тело. Соответствие частей сэндвич-панели материалам, из которых они изготовлены, приводится на рис. 3.

В качестве граничных условий задается жесткая заделка по краям тонких обшивок, а так же перемещение шарика в направлении обшивки равно 6 см (рис. 4). Время анализа задается равным $2E-04$ с.

Рассматривается 6 вариантов расчета в соответствии с выбранным количеством материалов тонких обшивок. Зависимости полученных результатов от времени анализа приводятся на рис. 5-8.

При решении динамической задачи в неявной постановке необходимо следить за энергией, ассоциированной с эффектом «песочных часов». Эта энергия обусловлена добавлением фиктивных сил и не должна превышать 10% от внутренней энергии системы. Опыт многочисленных расчетов показывает, что при превышении упомянутой величины искусственно рассеянная фиктивными силами энергия достаточна

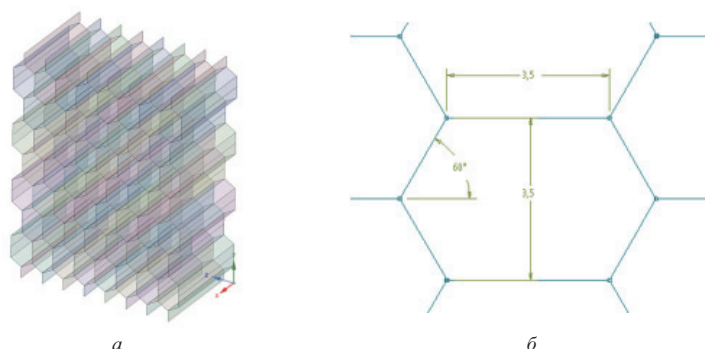


Рис. 1. Сотовый наполнитель: а – изометрический вид ячеек; б – размеры ячеек

Таблица 1. Механические константы материалов тонких обшивок сэндвич-панели

	Нержавею- щая сталь	Титановый сплав	Конструк- ционная сталь	Медный сплав	Магние- вый сплав	Алюминие- вый сплав
Плотность, кг/м ³	7750	4620	7850	8300	1800	2770
Модуль продольной упругости, Па	1.93E+11	9.6E+10	2E+11	1.1E+11	4.5E+10	7.1E+10
Коэффициент Пуассона	0.31	0.36	0.3	0.34	0.35	0.33
Предел текучести, Па	2.1E+08	9.3E+08	2.5E+08	2.8E+08	1.93E+08	2.8E+08
Касательный модуль, Па	1.8E+09	2.15E+09	1.45E+09	1.15E+09	9.20E+08	5E+08

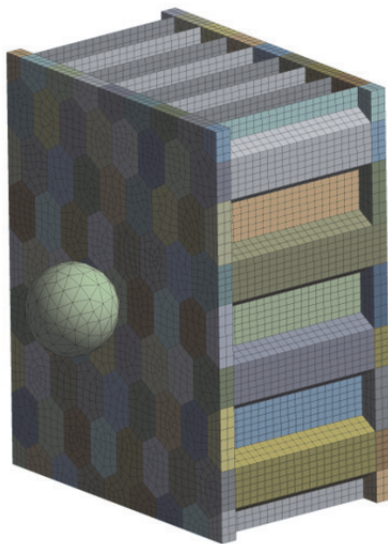


Рис. 2.

2. Элементная сетка сэндвич-панели и шарика

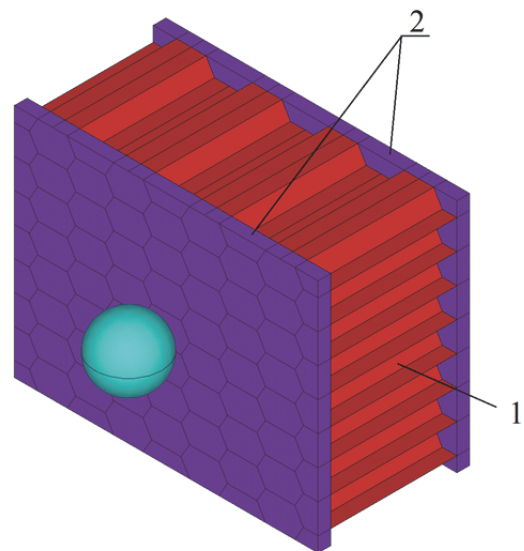
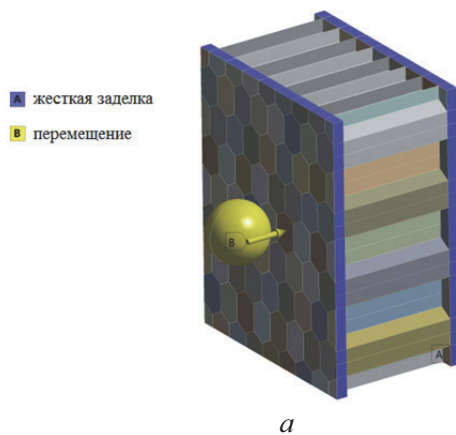
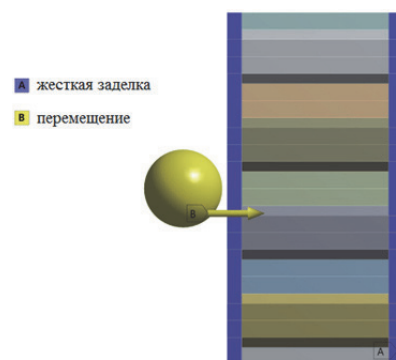


Рис. 3. Материалы сэндвич-панели:

1 – сотовый наполнитель, 2 – пластины



а



б

Рис. 4. Граничные условия:

а – изометрический вид; б – вид сбоку

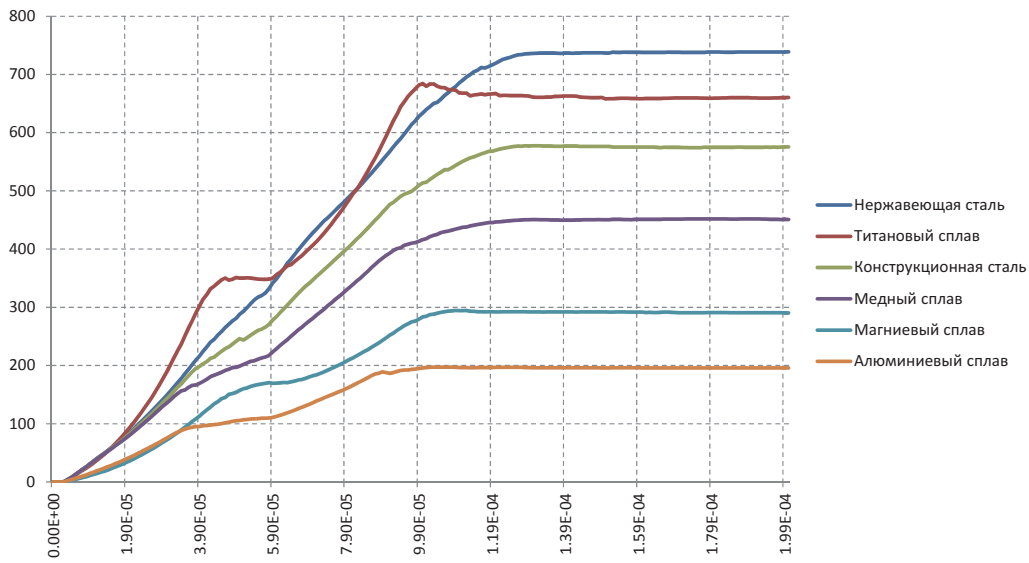


Рис. 5. Внутренняя энергия сэндвич-панели, Дж

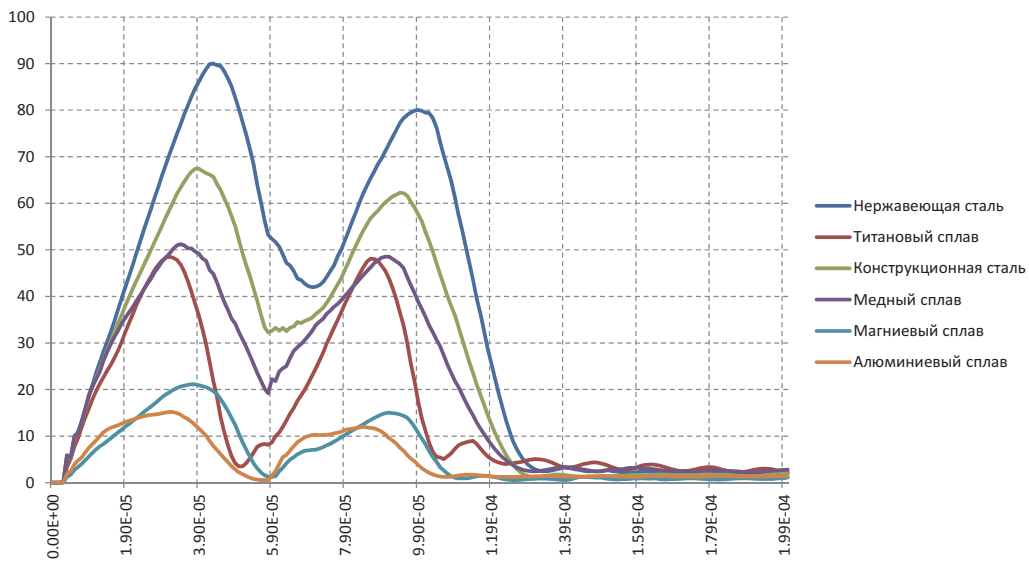


Рис. 6. Кинетическая энергия сэндвич-панели, Дж

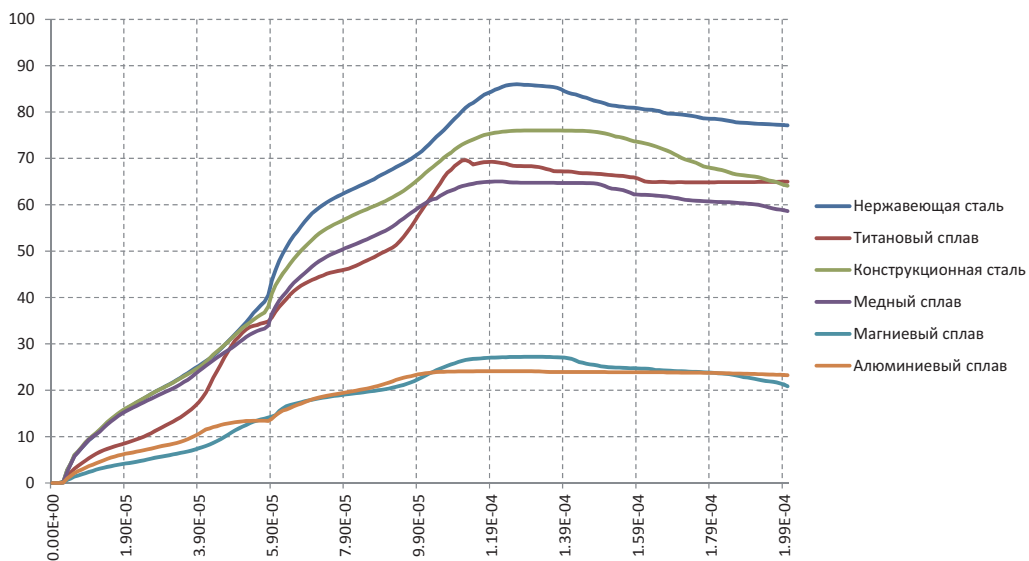


Рис. 7. Энергия сэндвич-панели, ассоциированная с эффектом "песочных часов", Дж

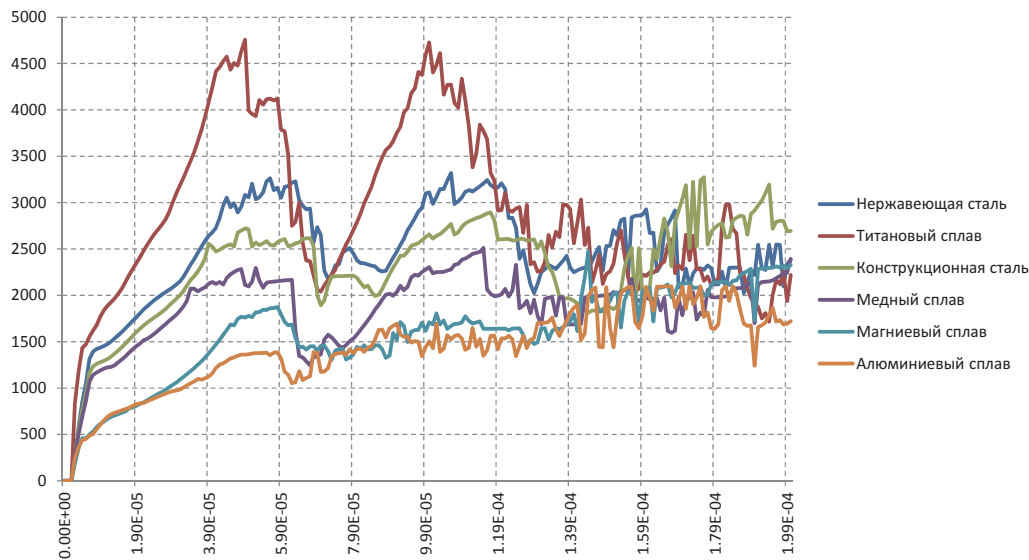


Рис. 8. Максимальное эквивалентное напряжение в сэндвич-панели, МПа

для существенного снижения точности результатов. В наших расчетах изменение энергии сэндвич-панели, ассоциированной с эффектом «песочных часов», по времени показано на рис. 7. В среднем, доля этой энергии составляет около 10% от внутренней энергии.

На рис. 9 приводится линейчатая диаграмма, ранжированная по максимальной внутренней энергии сэндвич-панели для различных вариантов расчета. Как видно из диаграммы, величина максимальной внутренней энергии соответствует сэндвич-панели с тонкими обшивками из нержавеющей стали.

Процесс ударного взаимодействия сэндвич-панели с тонкими обшивками из нержавеющей стали и шарика представлен в виде полей эквивалентных напряжений и перемещений на рисунках 10 и 11 соответственно.

Полученные результаты наглядно демонстрируют влияние материала тонких обшивок на величины кинетической энергии сэндвич-панели, максимальных эквивалентных напряжений, а

так же внутренней энергии, поглощенной сэндвич-панелью в процессе ее ударного взаимодействия с абсолютно твердым шаровидным телом.

Данный расчет актуален при выборе материала тонких обшивок сэндвич-панели с сотовым наполнителем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Palomba G., Epasto G., Crupi V., Guglielmino E. Single and double-layer honeycomb sandwich panels under impact loading. // International Journal of Impact Engineering. – Nov.2018– V 121. – P. 77 – 90.
2. Hou B., Wang Y., Sun T. F, Liu J. G., Zhao H. On the quasi-static and impact responses of aluminium honeycomb under combined shear-compression. // International Journal of Impact Engineering. – Sep. 201. – V.131. – P. 190-199.
3. He W, Yao L., Meng X., Sun G., Xie D., Liu J. Effect of structural parameters on low-velocity impact behavior of aluminum honeycomb sandwich structures with CFRP face sheets. // Thin-Walled Structures, 2019137, 411-432.

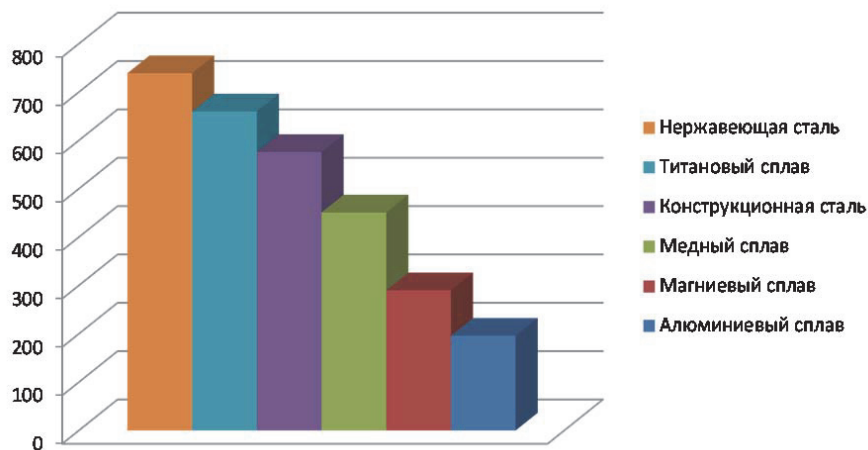


Рис. 9. Максимальная внутренняя энергия сэндвич-панели, Дж

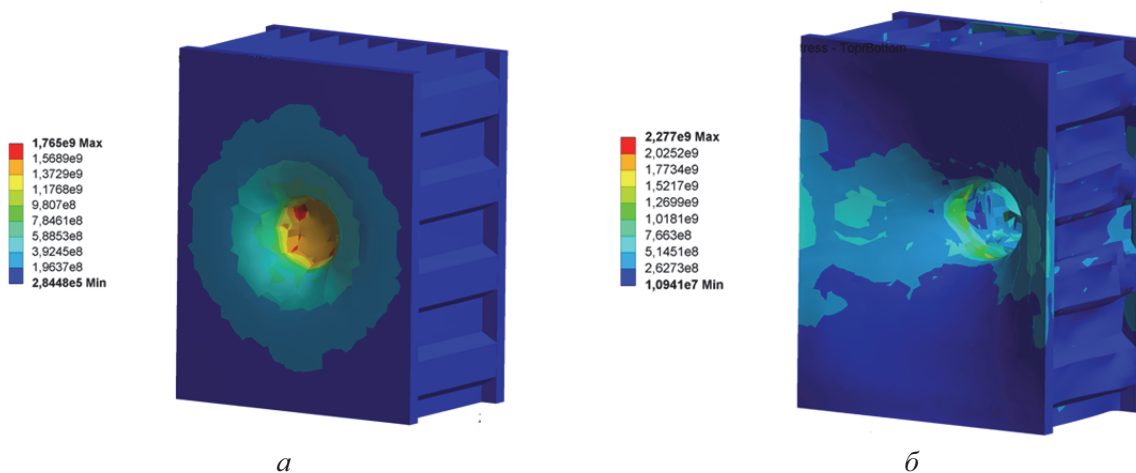


Рис. 10. Эквивалентные напряжения, Па:
 а – в момент удара шарика; б – после того, как шарик вылетел с противоположной стороны сэндвич-панели

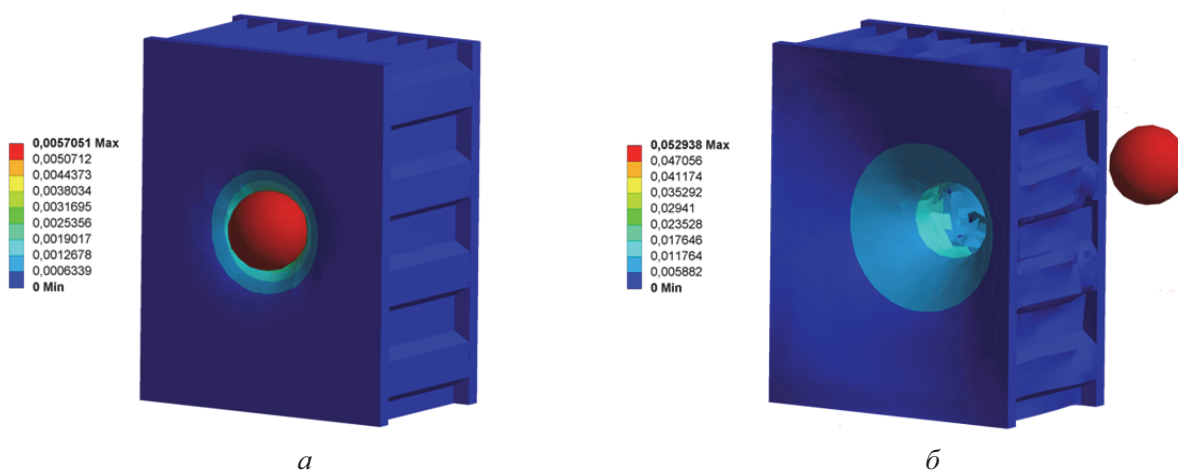


Рис. 11. Полное перемещение, м:
 а – в момент удара шарика; б – после того, как шарик вылетел с противоположной стороны сэндвич-панели

THE IMPACT RESPONSE OF HONEYCOMB STRUCTURE WITH THIN SHELLS MADE OF VARIOUS MATERIALS

© 2023 I. E. Adeyanov, M. Y. Alexandrova

Samara State Technical University, Samara, Russia

The use of honeycomb sandwich panels in the national economy has become widespread recently. Their advantages are the relative lightness with good strength capabilities. The article presents a calculation of the impact response between a honeycomb sandwich panel and an absolutely rigid spherical body. The value of internal and kinetic energy, as well as equivalent stress in a sandwich panel, is determined. The influence of materials of thin skins of sandwich panels on above values is analyzed. The problem is solved with computer simulation of the dynamic process in an explicit formulation. The work results are relevant in the design of structures that combine optimal strength and weight characteristics.

Key words: sandwich panel, honeycomb core, computer simulation, finite elements method, dynamic problem, internal energy.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-203-208

EDN: DYQFMF

Igor Adeyanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanics. E-mail: adigorev@gmail.com

Margarita Aleksandrova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics. E-mail: kris-maks@mail.ru