

УДК 677.6:624.042

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБКИХ, УДАРОПОГЛОЩАЮЩИХ ОБОЛОЧЕК  
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ**

**DESIGN FLEXIBLE, SHOCK-ABSORBING SHELLS  
UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING**

*А.М. КИСЕЛЕВ, М.В. КИСЕЛЕВ*  
*A.M. KISELYOV, M.V. KISELYOV*

(Костромской государственной технологической университет)  
(Kostroma State Technological University)  
E-mail: info@kstu.edu.ru

*В статье приводятся результаты проектирования гибких оболочек, исходя из заданных требований технического задания. Для решения задачи проектирования толщины оболочки выполнены расчеты ее напряженно-деформированного состояния при статическом давлении в 1,4 атм и динамическом ударе индентором с энергией 35 Дж. Задача построения математической модели НДС оболочки решалась численным методом конечных элементов. Поиск значения толщины оболочки в зависимости от воздействия внешних факторов осуществлялся методом итерации с выбором начального приближения. В результате расчетов даны конкретные обоснованные рекомендации по материалу и толщине оболочки, удовлетворяющей условиям ТЗ.*

*The article presents the results of the design of flexible membranes based on the specified requirements of technical specifications. For the solution of task of designing the shell thickness calculations made it stress-strain state etc. static pressure of 1.4 atm and dynamic impact indenter 35 J of energy. The problem of constructing a mathematical model of the VAT shell is solved numerically by finite element method. Search shell thicknesses depending on external factors was performed by iteration with the choice of the initial approximation. The calculations are based recommendations on specific material and thickness of the shell, satisfying the conditions of the terms of reference.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, прогнозирование, математическое моделирование, программное обеспечение.

**Keywords:** composite materials, forecasting, simulation, software.

Современные текстильные материалы, особенно синтетические, такие как полиамид, стекловолокно, арамидные, базальтовые и углеродные волокна, широко используются для производства композиционных материалов, испытывающих в процессе эксплуатации нагрузки различного характера, в том числе динамические [1...6]. Области применения таких материалов являются бронежилеты, геотекстильные материалы для дорожных покрытий, гибкие оболочки силовых конструкций для гашения кинетической энергии факторов внешней среды. Как структура любых новых материалов, так и структура подобных композиционных материалов до их изготовления должна быть предварительно спроектирована для обеспечения заданных технических характеристик.

В данной статье рассматривается задача проектирования гибкой, ударопрочной оболочки, исходя из конкретных требований промышленного предприятия. Исходными техническими требованиями для проектирования гибкой оболочки являлись следующие.

1. Оболочка должна выдерживать внутреннее избыточное давление до 1,4 атм.

2. Оболочка должна обладать высокими ударопоглощающими и влагозащитными свойствами и сохранять герметичность конструкции при ударных воздействиях с энергией 35 Дж.

3. Оболочка воспринимает только мембранные усилия на растяжение.

4. Принципиальная схема сетчатой композитной конструкции оболочки представлена на рис. 1.

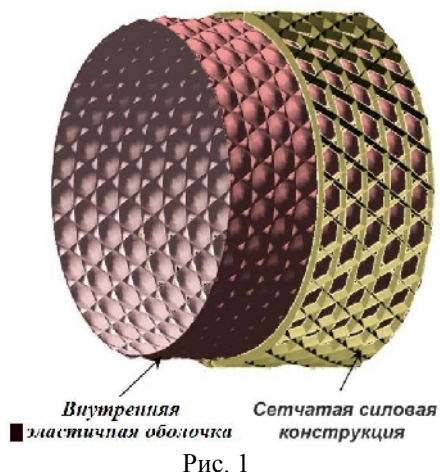


Рис. 1

Исходя из технических требований, материал внутренней обшивки должен обладать стабильными и ударопрочными свойствами. Поскольку натуральные волокна не обладают стабильностью физико-механических свойств (их разброс составляет величину до 1 порядка [7]), то наиболее подходящим материалом для оболочки будут синтетические волокна. Из них, с учетом требований ТЗ и физико-механических свойств материалов, выбран полиамид 6 [8].

Получение внутренней эластичной оболочки осуществляется с применением процесса плетения из лент с последующим применением препреговых технологий для получения герметичного монолитного композиционного материала. При математическом моделировании внутренняя оболочка представлялась в виде цельковой мембраны, соприкасающейся с ячейкой силовой сетчатой конструкции. Для расчета механических характеристик всей внутренней эластичной оболочки выбрана ее ячейка периодичности в связи с повторяющейся регулярной сеткой для уменьшения времени расчета.

Для обеспечения пункта 1 технического задания был выполнен расчет методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния внутренней оболочки при статическом нагружении. В качестве программного обеспечения выбран ППП ANSYS ver. 12.0.

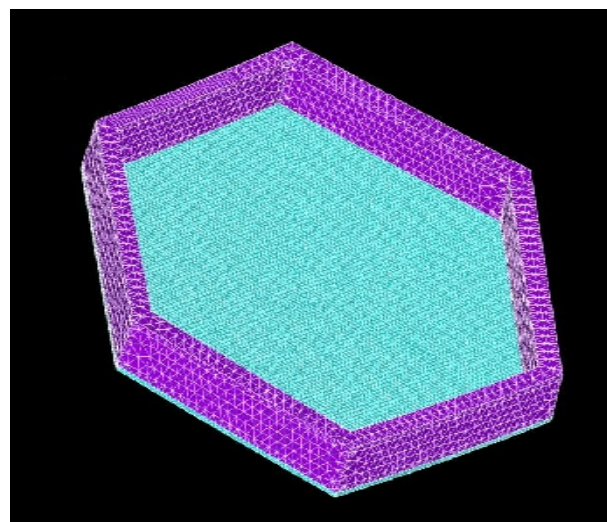


Рис. 2

Первым этапом решения задачи с применением метода конечных элементов является построение геометрической модели исследуемого объекта по данным ТЗ. В данном случае это контактные пары ячейки жесткого каркаса и внутренней оболочки. Построенная геометрическая модель, а также разбиение ее на конечные элементы представлено на рис. 2.

Задачей проектирования структуры композиционного материала в данном случае является определение его толщины, исходя из требований пунктов 1 и 2 ТЗ. Решение задачи будем осуществлять методом простой итерации с выбором начального приближения. В представленной модели толщина внутренней оболочки принята в качестве начального приближения равной 2 мм. В дальнейших расчетах предстоит решить задачу оптимизации толщины оболочки исходя из динамических расчетов. При задании физико-механических свойств оболочки предполагаем, что ее свойства идентичны свойствам чистого полиамида 6 [8]. Прикладывая граничные условия для решения задачи в виде жесткого закрепления каркаса и равномерного давления, действующего перпендикулярно оболочке и равного 1,4 атм, получаем картину распределения интенсивности

напряжений при статическом нагружении. Результаты расчетов при толщине оболочки 2 мм представлены на рис. 3.

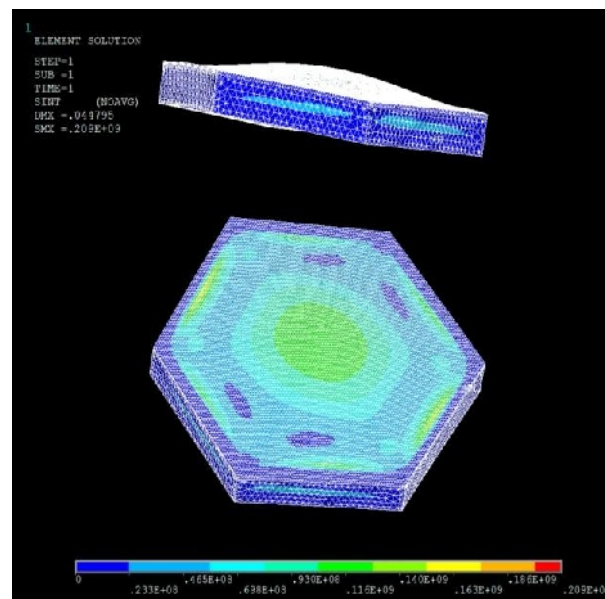


Рис. 3

В последующих расчетах толщина оболочки увеличивалась на 1 мм на каждой итерации, при тех же граничных условиях решения задачи. Результаты расчетов максимальной интенсивности напряжений в оболочке при ее различных толщинах представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Толщина оболочки, мм	Максимальная интенсивность напряжения в оболочке при P=1,4 атм, Па
1	2	$2,1 \cdot 10^8$
2	3	$1,5 \cdot 10^8$
3	4	$1,0 \cdot 10^8$
4	5	$0,66 \cdot 10^8$

Исходя из требований герметичности оболочки, необходимо обеспечить отсутствие ее разрушения при заданных силовых воздействиях. Учитывая предельное допускаемое напряжение разрушения полиамида 6 при растяжении в диапазоне  $0,65 \cdot 10^8 \dots 0,85 \cdot 10^8$  Па, можно с уверенностью утверждать, что для обеспечения пункта 1 ТЗ необходима толщина композиционного материала оболочки не менее 5 мм.

Для обеспечения пункта 2 ТЗ необходимо решать динамическую задачу деформирования оболочки внешним инденте-

ром. Исходя из заданной величины воздействия на оболочку с энергией в 35 Дж, решение задачи неоднозначно. В данном случае имеет место переход кинетической энергии внешнего индентора в изменение внутренней энергии оболочки через изменение ее напряженно-деформированного состояния. При этом кинетическая энергия определяется выражением:

$$E = m V^2/2.$$

При этом сочетание массы индентора и его скорости даст нужную комбинацию

заданного значения энергии. Для определенности возьмем наиболее неблагоприятный случай попадания в центр оболочки стального шарика диаметром 10 мм и массой 33 г со скоростью 46 м/с. Сочетание массы индентора и его скорости являются граничными условиями для решения динамической задачи при заданном значении энергетического воздействия.

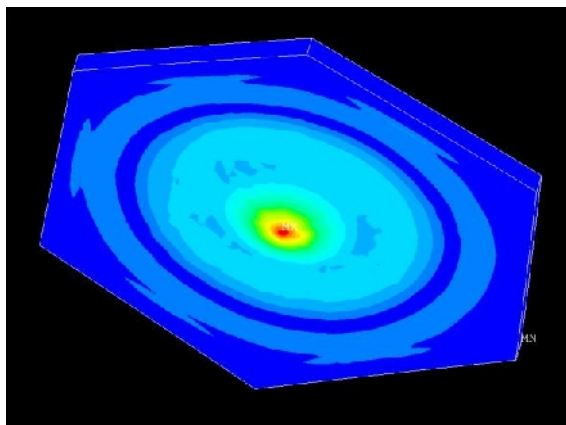


Рис. 4

Решим динамическую задачу ударного воздействия стального шарика на оболочку в ее центре. Задача проектирования также сводится к определению толщины оболочки. Начальным приближением выберем толщину оболочки в 2 мм. Результа-

ты решения динамической задачи для оболочки с толщиной 2 мм представлены на рис. 4.

Из результатов расчета видно, что максимальные напряжения в оболочке толщиной 2 мм в ее центре превышают значения предела прочности полиамида 6, что ведет к его разрушению и, как следствие, к разгерметизации, что недопустимо согласно требованиям ТЗ. Для устранения данной ситуации возможны варианты:

- увеличение диаметра индентора (большая контактная площадь приведет к снижению концентрации напряжений в центре удара);

- уменьшение скорости индентора (в соответствии с заданной энергией в 35 Дж);

- увеличение толщины оболочки.

При неизменных размерах индентора возможен только путь увеличения толщины оболочки. Для однозначного решения поставленной задачи была выполнена серия вычислительных экспериментов определения максимальных напряжений в оболочке при различных исходных данных динамической задачи, результаты которых представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

№ п/п	Диаметр индентора, м	Скорость, м/с	Толщина оболочки, мм	Максимальное напряжение в оболочке, Па
1	0,03	9	8	$2,3 \cdot 10^8$
2	0,06	3	2	$0,5 \cdot 10^8$
3	0,06	3	8	$0,28 \cdot 10^8$

Из данных табл. 2 видно, что условиям прочности оболочки удовлетворяют варианты расчетов 2 и 3. Таким образом, методом вычислительного эксперимента определено, что концентрация напряжений в оболочке существенно зависит от диаметра индентора при ее разных толщинах. При одной и той же величине энергии в 35 Дж при инденторе малого диаметра начинает разрушаться оболочка толщиной в 8 мм, а при крупном инденторе достаточно и толщины в 2 мм, и при этом обеспечивается герметичность оболочки.

Выполненные расчеты предоставляют заказчику информацию для принятия окончательного решения по характеристикам проектируемой эластичной оболочки в зависимости от комбинаций исходных данных.

## В Ы В О Д Ы

1. Разработана конечно-элементная модель расчета напряженно-деформированного состояния гибкой оболочки при

статическом и динамическом характере нагружения согласно заданному ТЗ.

2. На основе разработанных моделей рекомендованы числовые значения толщины оболочки при различных видах нагружения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Tong L., Mourilz A. P., Bannisler M. K.* 3D Fibre Reinforced Polymer Composites –Elsevier, 2002.
2. *Ciobanu L.* Development of 3D Knitted Fabrics for Advanced Composite Materials. – Technical University of Iasi, Romania, 2011.
3. Справочник по композиционным материалам // Под ред. Дж. Любина. В 2-х кн. – М.: Машиностроение, 1988.
4. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология // Под ред. Берлина А. А. – СПб.: "Профессия", 2009.
5. *Михайлин Ю. А.* Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. – СПб.: "Профессия", 2006.
6. *Киселев М.В., Трещалин Ю.М.* Конкуренентоспособные композиты для оборонных и гражданских секторов экономики России // Актуальные проблемы социально-экономического развития России. – 2012, № 4. С. 31...34.
7. *Перепелкин К.Е.* Структура и свойства волокон. – М.: Химия, 1985.

8. Интернет ресурс <http://www.anid.ru/poliamid/6>

#### REFERENCES

1. *Tong L., Mourilz A. P., Bannisler M. K.* 3D Fibre Reinforced Polymer Composites –Elsevier, 2002.
2. *Ciobanu L.* Development of 3D Knitted Fabrics for Advanced Composite Materials. – Technical University of Iasi, Romania, 2011.
3. Справочник по композиционным материалам // Под ред. Дзх. Лjubина. В 2-х кн. – М.: Mashinostroenie, 1988.
4. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология // Под ред. Берлина А.А. – СПб.: "Professija", 2009.
5. *Mihajlin Ju. A.* Termoustojchivye polimery i polimernye materialy. – SPb.: "Professija", 2006.
6. *Kiselev M.V., Treshhalin Ju.M.* Konkurentosposobnye kompozity dlja oboronnyh i grazhdanskih sektorov jekonomiki Rossii // Aktual'nye problemy social'no-jekonomicheskogo razvitija Rossii. – 2012, № 4. S. 31...34.
7. *Perepelkin K.E.* Struktura i svojstva volokon. – М.: Himija, 1985.
8. Internet resurs <http://www.anid.ru/poliamid/6>

Рекомендована кафедрой теории механизмов и машин и проектирования текстильных машин. Поступила 02.10.15.