

УДК 678.067.5

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-1-22-34

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ СИНТАКТОВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЫХ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

© 2021 г.

**Байков А.В.<sup>1</sup>, Турусов Р.А.<sup>2</sup>,  
Трофимов А.Н.<sup>1</sup>, Плешков Л.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>АО «НПО Стеклопластик», пос. Андреевка Московской обл.,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики  
им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Российская Федерация

mns-baikov@rambler.ru

*Поступила в редакцию 18.01.2021*

С помощью универсального программного комплекса Solid Works на примере кубической модели композита на основе полых стеклянных микросфер проведено численное моделирование упругого поведения синтактового материала при одноосном растяжении. Выбранная расчетная модель представляет собой полую тонкостенную стеклянную сферу, помещенную в полимерную (эпоксидную) матрицу кубической формы. Расчет модели проводился методом конечных элементов в упругой постановке с граничными условиями, определенными используемой универсальной программной системой 3D-моделирования комплекса Solid Works. Проведенные расчеты позволили определить продольные и поперечные упругие деформации для модели синтактового композита с различным содержанием исходных компонентов, а затем рассчитать величину модуля упругости и коэффициента Пуассона при растяжении для этих материалов.

Экспериментальная проверка проведенных расчетов проводилась на образцах синтактовых композитов на основе эпоксидного связующего и полых стеклянных микросфер марки МС-ВП А9 2 гр. Методом ситования из исходных микросфер была выделена размерная группа микросфер диаметром от 50 до 70 мкм. Средний диаметр этих микросфер составлял около 59 мкм. На основе отобранных таким образом микросфер были изготовлены образцы эпоксидных композитов с различным объемным содержанием компонентов (30, 40 и 50%) и замерены их фактические упругие характеристики при растяжении. Результаты экспериментов по определению упругих характеристик синтактовых композитов хорошо коррелируются с расчетами, особенно для композитов с коэффициентом наполнения полыми микросферами 0,45–0,5.

*Ключевые слова:* расчетная модель, синтактовый композит, полые стеклянные микросферы, полимерное связующее, коэффициент Пуассона, модуль Юнга, метод конечных элементов, напряжение, деформация, нагружение.

## **Введение**

Синтактовые композиты на основе полых стеклянных микросфер (ПСМ) и полимерных связующих нашли широкое применение в различных отраслях науки и техники. Эти материалы незаменимы при изготовлении элементов плавучести для глубоководных аппаратов с глубиной погружения более 1 000 метров [1, 2]. Использование синтактовых материалов на основе ПСМ позволяет создавать сэндвич-структуры с самыми высокими удельными упруго-прочностными характеристиками [3–5]. На основе полимеров, наполненных полыми стеклянными микросферами, изготавливается самая эффективная на сегодняшний день тепловая защита абляционного типа для космических аппаратов [6], а также высокоэффективная защита от ударно-волнового воздействия [7–9].

Несмотря на то, что синтактовые композиты уже много лет используются в высокотехнологичных отраслях промышленности, поведение этих материалов при различных видах деформации изучено недостаточно. В последние годы основные усилия были направлены на изучение поведения синтактовых композитов при одноосном и всестороннем сжатии [10, 11]. Однако до сих пор эта задача полностью не решена. В настоящее время среди специалистов даже нет единого мнения о том, по какому механизму происходит разрушение таких материалов при сжатии. Основная проблема заключается в том, что геометрические параметры (диаметр, толщина стенки) полых стеклянных микросфер, а следовательно, и их свойства (плотность и прочность) не могут быть однозначно детерминированы и определяются только законами распределения их вероятностей. Кроме этого, на механические характеристики синтактовых композитов существенное влияние оказывает случайное распределение неоднородных по свойствам микросфер в композите. Если к этому добавить, что механизм разрушения синтактовых композитов может радикально меняться в зависимости от степени наполнения полимера ПСМ, становится понятно, почему до сих пор не удается разработать стохастическую математическую модель, с помощью которой можно было бы прогнозировать поведение этих материалов при различных видах нагружения. Наименее изученным оказалось напряженно-деформированное состояние синтактовых композитов на основе ПСМ при растяжении и сдвиге.

В настоящей статье предпринята попытка расчетным путем определить упругие продольные и поперечные деформации простейшей модели синтактового композита с различным содержанием исходных компонентов при одноосном растяжении, а после экспериментального определения аналогичных характеристик образцов синтактовых композитов и сравнения полученных результатов с проведенными расчетами выбранной модели определить возможность прогнозирования расчетным путем упругих свойств (модуля упругости и коэффициента Пуассона) реальных синтактовых материалов при растяжении.

## **Модель и расчетные исследования**

Исследование ограничивается рассмотрением относительно простой модели синтактового композита, представляющей собой полую тонкостенную стеклянную сферу, помещенную в полимерную (эпоксидную) матрицу кубической формы (рис. 1).

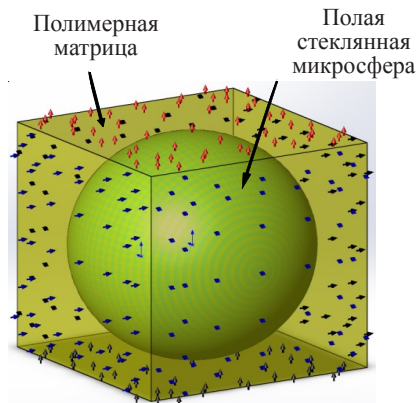


Рис. 1. Расчетная модель для определения упругих характеристик композита

Расчет по выбранной модели при одноосном растяжении проводился в упругой постановке методом конечных элементов с граничными условиями, определенными и используемой универсальной программной системой 3D-моделирования с возможностью конечно-элементного анализа программного комплекса Solid Works [12]. Эта программа позволяет провести расчет поперечной деформации и величины растягивающего усилия модели композита с различным объемным содержанием ПСМ и полимерного связующего. Кроме этого, программа позволяет расчетным путем оценить влияние толщины стенки микросферы на упругие свойства синтактового материала.

Моделирование объемного соотношения компонентов (коэффициента наполнения) в принятой модели осуществлялось изменением геометрических размеров (объема) полимерного куба при неизменном внешнем диаметре, а следовательно, и при постоянном объеме полый стеклянной микросферы. Для вычисления размера грани куба использовалось следующее выражение:

$$l = 2R^3 \sqrt{\pi/(6k)}, \quad (1)$$

где  $l$  – размер грани куба,  $R$  – внешний радиус микросферы,  $k$  – коэффициент наполнения (относительное объемное содержание ПСМ в композите).

Для выбранной кубической модели были определены два ограничения. Во-первых, внешний радиус полый микросферы для всех рассматриваемых случаев наполнения остается постоянным и составляет 30 мкм. Этот размер близок к среднему значению диаметра большинства марок промышленных полых стеклянных микросфер (50–60 мкм). Во-вторых, для рассматриваемой модели синтактового композита объемное содержание микросфер не может превышать 52%, то есть величина коэффициента объемного наполнения  $k$  не должна быть больше 0,52. Введение этого ограничения обосновано тем, что при объемном содержании ПСМ больше этой величины размер грани соответствующей кубической модели становится меньше диаметра микросферы. Кроме этого, при изготовлении композитов с высоким, более 52%, наполнением значительное количество хрупких тонкостенных стеклянных микросфер будет напрямую контактировать друг с другом. Несмотря на то, что в последние годы появилось много публикаций, посвященных исследованию поведения сплошных микрочастиц при их контакте друг с другом [13–17], механизм контактного взаимодействия полых стеклянных микросфер в синтактовых композитах до сих пор остается неизученным. Поэтому построение и расчет модели ком-

позита с предельным содержанием ПСМ, значительная часть которых находится в прямом контакте друг с другом, на сегодняшний день вряд ли возможны.

Были рассмотрены 5 вариантов объемного наполнения композита полыми стеклянными микросферами (30, 35, 40, 45 и 50%). Для каждого соотношения компонентов в расчетную программу были заложены по четыре возможных варианта толщины стенки полых микросфер (0,5, 1,0, 1,5 и 2 мкм). Для большинства марок промышленных ПСМ толщина их стенок укладывается в этот размерный интервал. Как уже отмечалось, каждому варианту наполнения при постоянном радиусе полый микросферы должен соответствовать свой, рассчитанный по формуле (1) размер грани кубической модели.

В качестве примера определим упругую поперечную деформацию модели синтактового композита с одинаковым объемным содержанием компонентов (коэффициент наполнения  $k = 0,5$ ) и толщиной стенки полый стеклянной микросферы  $t$ , равной 1 мкм. Для проведения расчетов прежде всего необходимо задать величину продольной упругой деформации (перемещения внешней поверхности) кубической модели. Это позволит рассчитать величину растягивающего усилия (результатирующую силу  $P$ ). Для обоснованного определения величины продольной деформации модели синтактового композита были проанализированы диаграммы растяжения реальных образцов синтактовых композитов с соответствующим (50%) объемным содержанием компонентов [18]. Приблизительно в середине упругого участка этой диаграммы была выбрана зона, в которой продольная деформация образца составляла около 0,08–0,085%. Применительно к модели с коэффициентом наполнения  $k = 0,5$  и размером грани 60,93 мкм соответствующее этой деформации перемещение верхней поверхности кубической модели должно составить около 0,05 мкм. Заложив в расчетную программу это значение продольной деформации, а также характеристики исходных материалов (табл. 1), можно рассчитать соответствующее растягивающее усилие ( $P = 8,9 \cdot 10^{-3}$  Н), а затем и относительную продольную деформацию модели композита  $\epsilon$  в направлении приложенной нагрузки (табл. 2). Полученных таким образом данных достаточно для расчета продольной жесткости выбранной модели при растяжении.

Таблица 1

Характеристики материалов		
Показатели	Материал	
	Стекло	Полимер
Модуль упругости, ГПа	70	3
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,50	1,20
Коэффициент Пуассона	0,26	0,35

Таблица 2

Относительная деформация модели	
Коэффициент наполнения $k$	Относительная продольная деформация, $10^{-4}$
0,30	8,3056
0,35	8,1516
0,40	8,3790
0,45	8,2396
0,50	8,2061

На рис. 2 представлено объемное компьютерное изображение поля напряжений, возникающих в составных частях рассматриваемой кубической модели при ее продольном растяжении.

Поскольку жесткость материалов характеризуется их модулем упругости, то в дальнейшем жесткость анализируемой модели синтактового композита будем называть (с определенными допущениями, конечно) условным модулем упругости. Для рассматриваемого случая индекс продольной жесткости при растяжении моде-

ли с равным объемным содержанием компонентов составляет  $178 \cdot 10^{-3}$  Н/мкм, а ее условный модуль упругости – 2,9 ГПа. Аналогично можно рассчитать упругие характеристики и для модели с другим объемным соотношением компонентов и с различной толщиной стенки полый микросферы.

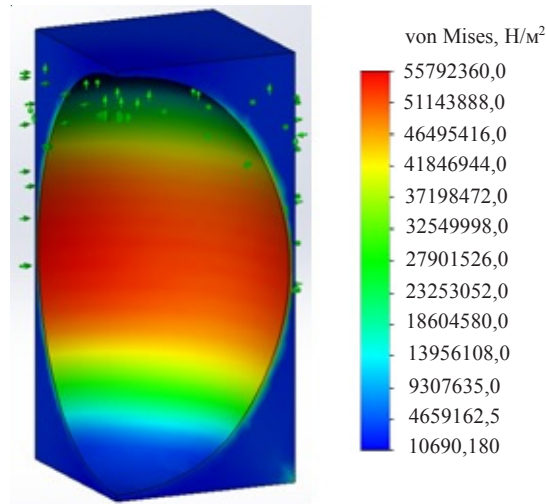


Рис. 2. Поле напряжений в объеме кубической модели

Для расчета условного коэффициента Пуассона необходимо дополнительно определить поперечную, а затем и относительную поперечную деформации модели композита при ее продольном растяжении. В результате действия растягивающего усилия поперечная деформация кубической модели происходит без какого-либо механического воздействия в этом направлении. Таким образом, зафиксировав выбранный уровень продольной деформации и подобрав поперечную деформацию, при которой результирующая сила равна нулю, с помощью используемой компьютерной программы можно рассчитать значение упругой поперечной деформации модели, а затем, зная размеры ее граней, можно рассчитать ее относительную поперечную деформацию и условный коэффициент Пуассона. Результаты этих расчетов объединены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчета упругих характеристик предложенной модели

Коэфф. наполнения ПСМ $k$	Толщина стенки ПСМ $t$ , мкм	Растягивающее усилие $P$ , Н·10 <sup>-3</sup>	Относительная поперечная деформация, 10 <sup>-3</sup>	Условный модуль упругости $E$ , ГПа	Условный коэфф. Пуассона $\mu$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
0,30	0,5	8,3	2,7652	1,9	0,333
	1,0	10,7	2,8659	2,5	0,345
	1,5	12,8	2,8905	3,0	0,348
	2,0	14,5	2,8986	3,4	0,349
0,35	0,5	7,9	2,6574	2,0	0,326
	1,0	10,0	2,7797	2,6	0,341
	1,5	12,1	2,8204	3,1	0,346
	2,0	13,3	2,8286	3,5	0,347

Таблица 3 (продолжение)

1	2	3	4	5	6
0,40	0,5	7,7	2,6721	2,2	0,319
	1,0	9,6	2,8041	2,7	0,337
	1,5	11,1	2,8837	3,1	0,344
	2,0	12,4	2,9008	3,5	0,346
0,45	0,5	7,5	2,5708	2,3	0,312
	1,0	9,3	2,7355	2,8	0,332
	1,5	10,6	2,8097	3,2	0,341
	2,0	11,7	2,8344	3,6	0,344
0,50	0,5	7,4	2,5011	2,4	0,305
	1,0	8,9	2,6899	2,9	0,328
	1,5	10,1	2,7819	3,3	0,339
	2,0	11,1	2,8137	3,6	0,343

Очевидно, что любая теоретическая модель синтактового композита не может в полной мере воспроизвести структуру и поведение реального материала. Прежде всего это обусловлено тем, что практически невозможно изготовить композит, наполненный микросферами строго одного диаметра, с одинаковой толщиной стенки и равномерным их распределением в объеме синтактового материала. Известно, что размеры и толщина стенок полых стеклянных микросфер варьируются в весьма широких пределах. Так, например, разброс диаметров промышленных ПСМ даже в пределах одной единовременно наработанной партии составляет от 10 до 130 мкм, а толщина стенки может изменяться от 0,4 до 2,5 мкм [19–21].

С целью снижения влияния вариативности геометрических характеристик микросфер на свойства синтактового композита производился отбор ПСМ, используемых для проведения запланированных экспериментальных исследований. Была выбрана марка полых стеклянных микросфер МС-ВП А9 2 гр., средний диаметр которых составляет около 50 мкм (по значению моды на дифференциальной кривой распределения). Этот диаметр наиболее близок к размеру микросферы (60 мкм), используемой при расчете упругих характеристик кубической модели синтактового композита. Затем из исходных ПСМ этой марки методом ситования была выделена размерная группа 50–70 мкм, в которой диаметр основной массы микросфер составил 59–62 мкм. После экспериментального определения плотности ПСМ этой размерной группы было рассчитано среднее значение толщины стенки микросфер, которое составило примерно 0,9 мкм. На основе отобранных таким образом микросфер были изготовлены образцы эпоксидных композитов с различным объемным содержанием компонентов (30, 40 и 50% ПСМ) и определены их фактические упругие характеристики при растяжении (рис. 3).



Рис. 3. Цилиндрический синтактовый образец в испытательной машине MTS Insight 100

На рис. 4 в виде графика представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по определению модуля упругости изготовленных образцов синтактовых композитов на основе отобранных микросфер. На рисунке линии соответствуют: 1 – ПСМ с толщиной стенки 2 мкм, 2 – 1,5 мкм, 3 – 1 мкм, 4 – 0,5 мкм. Как видно из представленных данных, условный модуль упругости, рассчитанный для модели синтактового композита, существенным образом зависит от объемного содержания микросфер (коэффициента наполнения). По очевидным причинам эта зависимость носит линейный характер, а положительный градиент изменения значения измеряемого параметра  $E$  (производная функции) тем выше, чем меньше толщина стенки микросфер. Значение производных линейных функций для ПСМ с толщинами стенки 0,5 и 2 мкм составляют соответственно 2,4 ГПа (см. рис. 4, линия 4) и 1,2 ГПа (см. рис. 4, линия 1).

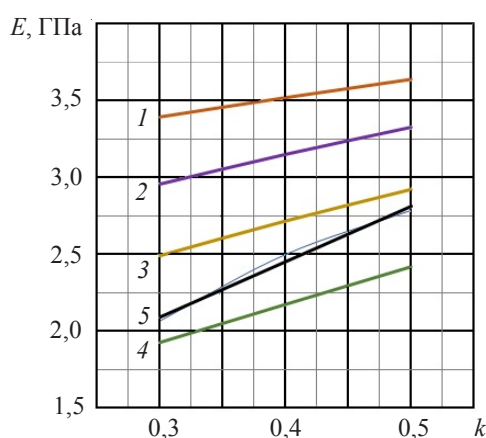


Рис. 4. Зависимость модуля упругости синтактового композита от объемного содержания ПСМ

Экспериментально полученная зависимость модуля упругости от относительного объемного наполнения синтактового композита микросферами также хорошо аппроксимируется прямой 5 на рис. 4. Эта прямая, соответствующая упругим характеристикам реальных синтактовых композитов с различным наполнением полыми микросферами с толщиной стенки около 0,9 мкм, расположена между расчетными прямыми 3 и 4, построенными для моделей синтактового композита с микросферами толщиной 0,5 и 1,0 мкм.

Обращает на себя внимание то, что градиент изменения упругих характеристик реального композита заметно больше, чем у значений, определенных расчетным путем (значение производной этой линейной зависимости равно 3,6 ГПа при средней толщине стенки сеянных микросфер около 0,9 мкм). Однако в целом результаты проведенных экспериментальных исследований неплохо коррелируются с расчетами, особенно для композитов с коэффициентом наполнения 0,45–0,5.

Расчетные данные, приведенные в таблице 3 и на рис. 4, показывают, что упругие характеристики синтактового композита определяются не только степенью его наполнения полыми стеклянными микросферами, но и толщиной их стенки. Так, например, при одном и том же коэффициенте наполнения ( $k = 0,5$ ) расчетный условный модуль упругости композита на основе микросфер с толщиной стенки 2 мкм более чем на 20% выше, чем при использовании микросфер с толщиной стенки 1 мкм (см. рис. 4).

Для иллюстрации вышесказанного на рис. 5 представлена зависимость условного расчетного модуля упругости анализируемой кубической модели от относительной толщины стенки поллой микросферы. На рисунке кривая 1 соответствует наполнению ПСМ 50% объема, кривая 2 – наполнению 40% объема, 3 – наполнению 30% объема. Видно, что степень влияния варьируемого параметра (толщина стенки микросферы) на отклик (условный модуль упругости) в этом случае гораздо выше. Даже незначительное увеличение толщины стенки приводит к весьма существенному изменению расчетных упругих характеристик модели синтактового композита. Однако это изменение уже не подчиняется линейному закону, а характер кривых, приведенных на рис. 5, свидетельствует о том, что производная этих зависимостей плавно снижается по мере увеличения толщины стенки микросфер. Таким образом, можно констатировать, что по мере увеличения толщины стенки ПСМ степень влияния этого фактора на упругие характеристики композита снижается.

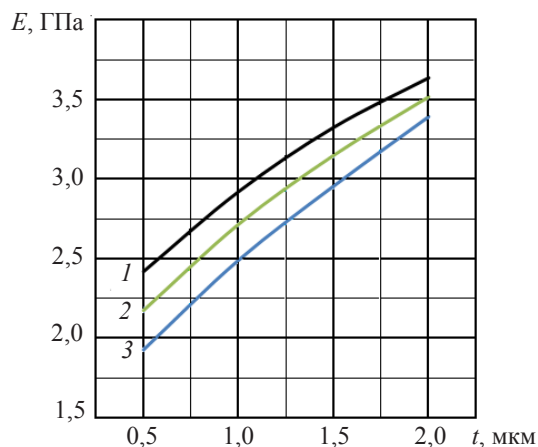


Рис. 5. Зависимость модуля упругости синтактового композита от толщины стенки ПСМ

Вклад полимерного компонента в упругие свойства высоконаполненных синтактовых композитов на основе ПСМ относительно невелик. Упругие деформационные характеристики синтактика, наполненного ПСМ, определяются, в основном, двумя факторами. Во-первых, содержанием в композите высокомодульного стеклянного компонента (коэффициентом наполнения ПСМ) и, во-вторых, жесткостью самих микросфер. Известно, что прочность и жесткость (упругое формоизменение) тонкостенных оболочек, в том числе стеклянных, определяется прежде всего толщиной их стенок [19]. Поскольку эта зависимость степенная, влияние толщины стенки на упругую деформацию поллой тонкостенной микросферы, а следовательно, и на упругую деформацию композита на ее основе, очень велико. Однако по мере увеличения толщины стенки жесткость микросферы становится настолько высокой, что упругое изменение ее геометрии уже не оказывает большого влияния на жесткость композита в целом. Поэтому при достижении определенной толщины стенки микросфер повышение упругих характеристик композита начинает больше зависеть от увеличения объема содержащегося в нем высокомодульного стеклянного компонента.

Результаты расчетов условного коэффициента Пуассона с использованием выбранной кубической модели приведены в таблице 3 и на рис. 6 и 7. Очевидно, что изменение коэффициента Пуассона в зависимости от толщины стенки поллой стек-



лянной микросферы и степени наполнения синтактового композита должны подчиняться тем же закономерностям, что были определены при расчете модели для условного модуля упругости. Следовательно, зависимость коэффициента Пуассона от объемного содержания компонентов также должна быть линейной. Однако в этом случае получается отрицательный градиент изменения расчетного коэффициента Пуассона синтактового материала по мере увеличения в нем объемного содержания полых стеклянных микросфер (см. рис. 6, где линия 1 – для ПСМ с толщиной стенки 2 мкм, 2 – с толщиной стенки 1,5 мкм, 3 – с толщиной 1 мкм, 4 – 0,5 мкм; 5 – эксперимент).

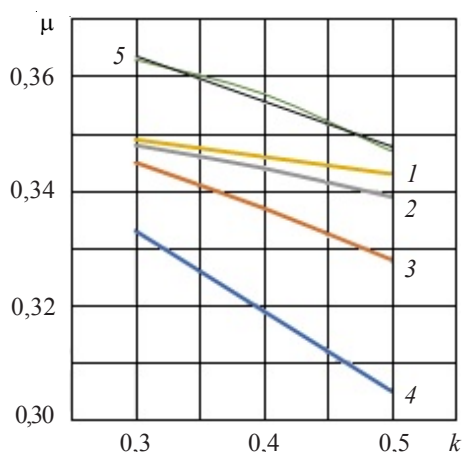


Рис. 6. Зависимость коэффициента Пуассона синтактового композита при растяжении от объемного содержания ПСМ

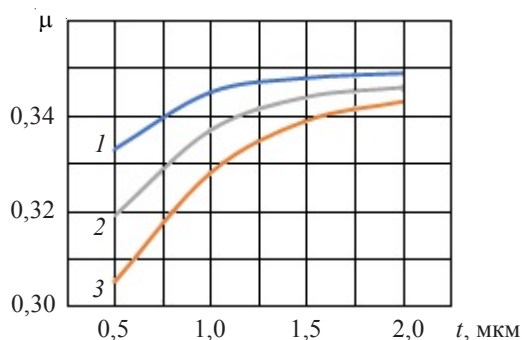


Рис. 7. Зависимость коэффициента Пуассона синтактового композита при растяжении от толщины стенки ПСМ

Производная функции влияния толщины стенки полый микросферы на коэффициент Пуассона синтактового композита также снижается по мере увеличения толщины стенки (см. рис. 7, где кривая 1 – наполнение 50% объема, 2 – наполнение 40% объема, 3 – наполнение 30% объема). При определенной относительной толщине стенки микросфер кривая выходит на плато и коэффициент Пуассона композита при растяжении практически перестает изменяться.

## Заключение

Использование универсальной программной системы 3D-моделирования с возможностью конечно-элементного анализа комплекса Solid Works для расчета предложенной кубической модели позволяет провести предварительную оценку упругих характеристик синтактовых композитов с различным содержанием полых стеклянных микросфер.

Упругие характеристики синтактового композита при растяжении определяются, прежде всего, двумя факторами: толщиной стенки полых стеклянных микросфер и их объемным содержанием в композитном материале. Зависимость модуля упругости и коэффициента Пуассона композита от степени его наполнения ПСМ – линейная. Однако зависимость упругих характеристик синтактового материала от толщины стенки полых микросфер не подчиняется линейному закону, а производная этой функции плавно снижается по мере увеличения толщины стенки ПСМ. При достижении определенной относительной толщины стенки микросфер изменение упругих характеристик композита начинает больше зависеть не от этого фактора, а от объемного содержания в композите высокомодульного стеклянного компонента (ПСМ).

### Список литературы

1. Seamark M.J. Use of syntactic foam for subsea buoyancy. *Journal of Cellular Plastics*. 1991. Vol. 10. No 4. P. 308–321.
2. Hinves J.B., Douglas C.D. The development of a hybrid advanced composite-syntactic foam structural component for use in undersea vehicles. *Proceedings of OCEANS '93*. 8–21 Oct. 1993. Victoria, BC, Canada. 1993. P. III-468–III-472. DOI: 10.1109/OCEANS.1993.326234.
3. Gupta N., Zeltmann S.E., Shunmugasamy V.C., Pinisetty D. Applications of polymer matrix syntactic foams. *JOM*. 2014. Vol. 66. Iss. 2. P. 245–254. DOI: 10.1007/s11837-013-0796-8.
4. Jize N., Hiel C., Ishai O. Mechanical performance of composite sandwich beams with syntactic foam cores. In: *Composite Materials: Testing and Design*. Vol. 12. Eds. R. Deo, C. Saff. PA: ASTM International, 1996. P. 125–138. <https://doi.org/10.1520/STP16542S>.
5. Trofimov A., Pleshkov L. Hollow glass microspheres for high strength composite cores. *Reinforced Plastics*. 2006. Vol. 50. Iss. 7. P. 44–50. DOI: 10.1016/S0034-3617(06)71074-8.
6. Yazica M., Fahr P., Shukla A. Development of a polymer based syntactic foam for high temperature applications. *Acta Physica Polonica A*. 2014. Vol. 125. No 2. P. 526–528. DOI: 10.12693/APhysPolA.125.526.
7. Gupta N., Kishore, Woldesenbet E., Sankaran S. Studies on compressive failure features in syntactic foam material. *Journal of Materials Science*. 2001. Vol. 36. No 18. P. 4485–4491. DOI: 10.1023/A:1017986820603.
8. Huang J.S., Gibson L.J. Elastic module of a composite of hollow spheres in a matrix. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1993. Vol. 41. No 1. P. 55–75. DOI: 10.1016/0022-5096(93)90063-L.
9. Koopman M., Chawla K., Carlisle K., Gladysz G. Microstructural failure modes in three-phase glass syntactic foams. *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41. Iss. 13. P. 4009–4014. DOI: 10.1007/s10853-006-7601-9.
10. Porfiri M., Gupta N. Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties of hollow particle filled composites. *Composites. Part B: Engineering*. 2009. Vol. 40. Iss. 2. P. 163–173. DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.09.002.
11. Gupta N., Woldesenbet E. Microballoon wall thickness effects on properties of syntactic forms. *Journal of Cellular Plastics*. 2004. Vol. 40. Iss. 6. P. 461–480. DOI: 10.1177/0021955X04048421.
12. Зенкевич О. *Метод конечных элементов в технике*. М.: Мир, 1975. 420 с.

13. Мельниченко Г.И. Устойчивость сферической оболочки под действием локальных нагрузок. *Сопротивление материалов и теория сооружений*: Сб. статей. Киев, 1974. Вып. 23. С. 56–61.
14. Мемарианфард М., Турусов Р.А., Мемарианфард Х. Численные и экспериментальные исследования монолитности толстостенной анизотропной оболочки. *Вестник МГСУ*. 2016. Вып. 7. С. 36–45. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.7.36-45.
15. Вольмир А.С. *Гибкие пластинки и оболочки*. М.: ГИТТЛ, 1956. 419 с.
16. Gupta N., Woldesenbet E., Kishore. Compress fracture feature of syntactic foams-microscopic examination. *Journal of Materials Science*. 2002. Vol. 37. No 15. P. 3199–3209. DOI: 10.1023/A:1016166529841.
17. Bardella L., Genna F. On the elastic behavior of syntactic foams. *International Journal of Solids and Structures*. 2001. Vol. 38. Iss. 40-41. P. 7235–7260. DOI: 10.1016/S0020-7683(00)00228-6.
18. Ruoxuan H., Peifeng L. Elastic behavior and failure mechanism in epoxy syntactic foams: The effect of glass microballoon volume fractions. *Composites. Part B: Engineering*. 2015. Vol. 78. P. 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.002>.
19. Плешков Л.В., Трофимов А.Н., Байков А.В., Смирнов А.А. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 2. О взаимосвязи геометрии полых стеклянных микросфер и их потребительских свойств. *Пластические массы*. 2021. № 1-2. С. 33–37. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-33-37.
20. Трофимов А.Н., Плешков Л.В., Байков А.В., Стогова И.В. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Часть 1. О размерах промышленных полых стеклянных микросфер. *Пластические массы*. 2020. №11-12. С. 15–19. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-11-12-15-19.
21. Amos S.E., Yalcin B. *Hollow Glass Microspheres for Plastics, Elastomers and Adhesives Compounds*. Amsterdam–London–New York: Elsevier Science, 2015. 478 p.

#### References

1. Seamark M.J. Use of syntactic foam for subsea buoyancy. *J. Cell. Plast.* 1991. Vol. 10. No 4. P. 308–321.
2. Hives J.B., Douglas C.D. The development of a hybrid advanced composite- syntactic foam structural component for use in undersea vehicles. *Proceedings of OCEANS '93*. 8–21 Oct. 1993. Victoria, BC, Canada. 1993. P. III-468–III-472. DOI: 10.1109/OCEANS.1993.326234.
3. Gupta N., Zeltmann S.E., Shunmugasamy V.C., Pinisetty D. Applications of polymer matrix syntactic foams. *JOM*. 2014. Vol. 66. Iss. 2. P. 245–254. DOI: 10.1007/s11837-013-0796-8.
4. Jize N., Hiel C., Ishai O. Mechanical performance of composite sandwich beams with syntactic foam cores. In: *Composite Materials: Testing and Design*. Vol. 12. Eds. R. Deo, C. Saff. PA. ASTM International. 1996. P. 125–38. <https://doi.org/10.1520/STP16542S>.
5. Trofimov A., Pleshkov L. Hollow glass microspheres for high strength composite cores. *Reinforced Plastics*. 2006. Vol. 50. Iss. 7. P. 44–50. DOI: 10.1016/S0034-3617(06)71074-8.
6. Yazica M., Fahr P., Shukla A. Development of a polymer based syntactic foam for high temperature applications. *Acta Phys. Pol. A*. 2014. Vol. 125. No 2. P. 526–528. DOI: 10.12693/APhysPolA.125.526.
7. Gupta N., Kishore, Woldesenbet E., Sankaran S. Studies on compressive failure features in syntactic foam material. *J. Mater Sci.* 2001. Vol. 36. No 18. P. 4485–4491. DOI: 10.1023/A:1017986820603.
8. Huang J.S., Gibson L.J. Elastic module of a composite of hollow spheres in a matrix. *J. Mech. Phys. Solids*. 1993. Vol. 41. No 1. P. 55–75. DOI: 10.1016/0022-5096(93)90063-L.
9. Koopman M., Chawla K., Carlisle K., Gladysz G. Microstructural failure modes in three-phase glass syntactic foams. *J. Mater. Sci.* 2006. Vol. 41. Iss. 13. P. 4009–4014. DOI: 10.1007/s10853-006-7601-9.
10. Porfiri M., Gupta N. Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties of hollow particle filled composites. *Composites. Part B: Engineering*. 2009. Vol. 40. Iss. 2. P. 163–173. DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.09.002.
11. Gupta N., Woldesenbet E. Microballoon wall thickness effects on properties of syntactic forms. *J. Cell. Plast.* 2004. Vol. 40. Iss. 6. P. 461–480. DOI: 10.1177/0021955X04048421.

12. Zenkevich O.C. *The Finite Element Method in Engineering Science*. London. New York. McGraw-Hill. 1971. 521 p.
13. Melnichenko G.I. Ustoychivost sfericheskoy obolochki pod deystviem lokalnykh nagruzok. [Stability of a spherical shell under the action of local loads]. *Soprotivlenie materialov i teoriya sooruzheniy* [Resistance of Materials and Theory of Structures]. Collection of articles. Kiev. 1974. Iss. 23. P. 56–61 (In Russian).
14. Memarianfard M., Turusov R.A., Memarianfard H. Numerical and experimental studies of monolithic character of thick-walled anisotropic shell. *Vestnik MGSU*. 2016. Iss. 7. P. 36–45. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.7.36-45 (In Russian).
15. Volmir A.S. *Gibkie plastinki i obolochki* [Flexible Plates and Shells]. Moscow. GITTL Publ. 1956. 419 p. (In Russian).
16. Gupta N., Woldeesenbet E., Kishore. Compress fracture feature of syntactic foams-microscopic examination. *J. Mater. Sci.* 2002. Vol. 37. No 15. P. 3199–3209. DOI: 10.1023/A:1016166529841.
17. Bardella L., Genna F. On the elastic behavior of syntactic foams. *Int. J. Solids Struct.* 2001. Vol. 38. Iss. 40-41. P. 7235–7260. DOI: 10.1016/S0020-7683(00)00228-6.
18. Ruoxuan H., Peifeng L. Elastic behavior and failure mechanism in epoxy syntactic foams: The effect of glass microballoon volume fractions. *Compos. Part B. Eng.* 2015. Vol. 78. P. 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.002>.
19. Pleshkov L.V., Trofimov A.N., Baykov A.V., Smirnov A.A. Morfologiya i svoystva polykh steklyannykh mikrosfer. Chast 2. O vzaimosvyazi geometrii polykh steklyannykh mikrosfer i ikh potrebitelskikh svoystv [Morphology and properties of hollow glass microspheres. Part 2. On the relationship between the geometry of hollow glass microspheres and their consumer properties]. *Plasticheskie massy* [Plastic Masses]. 2021. No 1-2. P. 33–37. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-33-37 (In Russian).
20. Trofimov A.N., Pleshkov L.V., Baykov A.V., Stogova I.V. Morfologiya i svoystva polykh steklyannykh mikrosfer. Chast 1. O razmerakh promyshlennykh polykh steklyannykh mikrosfer [Morphology and properties of hollow glass microspheres. Part 1. On the dimensions of industrial hollow glass microspheres]. *Plasticheskie massy* [Plastic Masses]. 2020. No 11-12. P. 15–19. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-11-12-15-19 (In Russian).
21. Amos S.E., Yalcin B. *Hollow Glass Microspheres for Plastics, Elastomers and Adhesives Compounds*. Amsterdam. London. New York. Elsevier Science. 2015. 478 p.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE ELASTIC BEHAVIOR OF SYN-CYCLE COMPOSITES BASED ON HOLLOW GLASS MICROSPHERES UNDER TENSION

**Baykov A.V.<sup>1</sup>, Turusov R.A.<sup>2</sup>, Trofimov A.N.<sup>1</sup>, Pleshkov L.V.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>JSC “NPO Stekloplastik”, Moscow region, Andreevka, Russian Federation

<sup>2</sup>N.N. Semenov Federal Research Centre for Chemical Physics RAS,  
Moscow, Russian Federation

Using the universal software package “Solid Works”, on the example of a cubic model of a composite based on hollow glass microspheres (HGM), numerical simulation of the elastic behavior of a syntactic material under uniaxial tension is carried out. The chosen computational model is a hollow thin-walled glass sphere placed in a polymer (epoxy) matrix of cubic shape. The model was calculated using the finite-element method in an elastic approach with boundary conditions defined by the used universal software system of 3D modeling of the “Solid Works” complex. The calculations made it possible to determine the longitudinal and transverse elastic strains for the model of a syntactic composite with different contents of the initial components and then to calculate the value of the elastic modulus and the Poisson's ratio under tension for these materials.

Experimental verification of the calculations performed was carried out on samples of syntactic composites based on epoxy binder and HGM of type MC-BIIA9 2 gr. A size group of microspheres

with a diameter of 50 to 70 microns was isolated from the initial HGM by sieving method. The average diameter of these microspheres was about 59 microns. On the basis of the microspheres selected in this way, samples of epoxy composites with different volume contents of components (30%, 40% and 50% HGM) were made and their actual elastic characteristics under tension were measured. The results of experiments to determine the elastic characteristics of syntactic composites correlate well with the calculations, especially for composites with a filling coefficient of 0.45–0.5 with hollow microspheres.

*Keywords:* computational model, syntactic composite, hollow glass microspheres, polymer binder, Poisson's ratio, Young's modulus, finite element method, stress, strain, loading.