

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-40-50  
УДК 539.422:678.7

П.А. Додонов  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СФЕРОПЛАСТИКА

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования является полимерный композиционный материал типа сферопластик (СФП), который представляет собой гетерогенную среду, состоящую из полимерной матрицы, наполненной сферическими включениями – микросферами. В работе предложено рассмотреть распределения напряжений микросфер в составе СФП в роли качественной оценки расчетных методик. Сравнения таких распределений для разных моделей может быть использовано для объяснения результатов расчетов эффективных свойств СФП.

**Материалы и методы.** Исходными данными для исследований являлись состав и структура сферопластика и характеристики его компонентов: полимерной матрицы и стеклянных микросфер. Численные исследования проводились с использованием разработанной ранее структурной модели деформирования и разрушения сферопластика. Структурная модель оценивает напряженно-деформированное состояние (НДС) больших ансамблей микросфер (в работе используются модели с количеством сфер порядка  $10^5$ ). Результаты модели позволяют применить статистические методы обработки концентраторов напряжений, выявить закономерности в распределениях для прогнозирования прочности СФП. Верификация результатов проведена путем сравнения с результатами расчетов конечно-элементных (КЭ) моделей.

**Основные результаты.** Структурная модель деформирования и разрушения сферопластиков обладает большой эффективностью при расчете напряженно-деформированного состояния микроструктур с количеством микросфер порядка  $10^5$  и более. Сопоставление с результатами КЭ моделей показало, что результаты моделирования согласуются с ними как по качественным, так и по количественным оценкам.

**Заключение.** Разработанная структурная модель СФП позволяет точно оценивать напряженное состояние ее компонент под внешним гидростатическим давлением при рассмотрении статистически значительного числа микросфер. Результаты показывают отличную сходимость НДС с расчетами детализированных КЭ моделей. Используя точные данные об НДС микроструктуры материала, можно прогнозировать развитие повреждений, рассчитать процесс его разрушения вплоть до полной потери плавучести.

**Ключевые слова:** сферопластик, напряжения, структура, моделирование, пористость, микросферы, гидростатическая прочность, плавучесть.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-40-50  
UDC 539.422:678.7

P.A. Dodonov  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## STATISTICAL APPROACH TO DESCRIPTION OF STRESSED STATE OF SYNTACTIC FOAM MICROSTRUCTURE

**Object and purpose of research.** The object of research is a composite material of the syntactic foam type (SF), which forms a heterogeneous medium consisting of a polymer matrix filled with spherical inclusions- micro spheres. The paper suggests that distribution of micro spheres in SF should be used as a qualitative measure for estimation procedures. Comparison of such distribution for various models can be used for explaining the SF efficiency estimations.

*Для цитирования:* Додонов П.А. Статистический подход к описанию напряженного состояния микроструктуры сферопластика. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 2(400): 40–50.

*For citations:* Dodonov P.A. Statistical approach to description of stressed state of syntactic foam microstructure. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 2(400): 40–50 (in Russian).

**Materials and methods.** The initial data inputs for the study were the composition and structure of syntactic foam and characteristics of its components: polymer matrix and glass micro spheres. Numerical studies were carried out using the earlier developed structural model of SF deformation and damage. The structural model assesses the stressed-strained state of large micro sphere assemblies (models with a number of spheres about  $10^5$  are used in the study). Results obtained by the model let us use statistical methods of processing the stress raisers and identify patterns of distributions for predicting the SF strength. The results are verified by comparison with estimations by finite element models.

**Main results.** The structural model of deformation and damage is highly effective in calculation of the stressed-strained state of micro structures with a number of micro spheres of about  $10^5$  and more.

**Conclusion.** The structural model developed for SF makes it possible to accurately assess the stresses of its components under external hydrostatic pressure considering a large number of micro spheres. The results show excellent convergence of the stressed-strained state estimates with detailed estimations by FE models. With accurate data on the stressed-strained state of micro structure one can predict how the damage would develop and calculate the process to failure and full loss of buoyance.

**Keywords:** syntactic foam, structure, modeling, porosity, micro spheres, hydrostatic strength, buoyance.

*The author declares no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Сферопластик (СФП) представляет собой гетерогенный материал, состоящий из плотно упакованных полых стеклянных микросфер (ПСМ), расположенных в полимерной матрице. Материал используется в качестве элементов плавучести глубоководной техники [1–3].

В процессе получения нового СФП проводится работа по выбору компонент материала, которые позволят достичь требуемых характеристик прочности и надежности. В зависимости от выбора компонент и особенностей целевой конструкции, подбираются технология и методы производства: подготовка компонент и сырья для них, технология изготовления финального материала.

При разработке новых СФП высокой удельной прочности важно иметь расчетный аппарат, позволяющий смоделировать поведение материала при действии гидростатического давления. Возможность спрогнозировать гидростатическую прочность СФП и его плавучесть, исходя из характеристик исходных компонентов – микросфер и полимерной матрицы, позволяет сформулировать научно обоснованные требования к этим характеристикам для получения материала с требуемыми свойствами. Затраты на создание нового СФП могут быть сокращены за счет уменьшения количества вариантов рецептуры, перебираемых при технологической обработке материала.

Широко распространенный в настоящее время метод конечных элементов (МКЭ или КЭ) применяется для определения деформативности и прочности СФП на микроуровне как при одноосном, так и при всестороннем нагружении. Однако по-

лучение КЭ решения при моделировании реальной структуры СФП сталкивается с трудностями. Обычно рассматривается взаимодействие между несколькими микросферами и исследуется структура с относительно низким их объемным содержанием [4–6]. Малое число сфер ( $< 50$ ) в моделях не позволяет полно отразить хаотичность структуры материала: взаимного расположения сфер, неопределенности толщин стенок сфер, наличия дефектов и воздушных пор.

Также из-за низкого количества сфер, исчисляемого сотнями, невозможно корректно смоделировать структуру СФП, содержащую ансамбль микросфер, если среди них присутствуют сферы различных размеров. К примеру, при добавлении в структуру с 125 сферами малого размера одной крупной, диаметром в 5 раз больше, объемная доля крупной сферы будет равна суммарной объемной доле всех 125 малых сфер.

Если необходимо отразить в модели малую объемную долю крупных сфер, то потребуются значительное увеличение количества сфер. Реально изготавливаемые марки ПСМ обладают распределениями объемных долей с диапазоном размеров от 5 до 70 мкм и более. Такие размерные распределения для ПСМ являются одним из необходимых условий достижения высокого максимального коэффициента заполнения объема (КЗО) для ПСМ. Высокий максимальный КЗО, в свою очередь, является одним из ключевых показателей эффективности ПСМ, т.к. позволяет добиться контроля над плотностью изготавливаемого СФП в более широком диапазоне значений.

Нами ранее была разработана структурная модель деформирования и разрушения гетерогенных материалов типа СФП со сферическими включениями при действии всестороннего гидростатического

давления [7–10, 14]. Структурная модель оценивает напряженно-деформированное состояние больших ансамблей микросфер (в работе используются модели с числом сфер  $< 100\,000$ ). Результаты модели позволяют применить статистические методы обработки концентраторов напряжений, выявить закономерности в распределениях для прогнозирования прочности СФП. В работе также рассматриваются дефекты типа воздушных пор и поврежденных сфер с точки зрения их влияния на напряженное состояние и несущую способность блоков СФП.

## Методы исследования

Methods of investigation

### Структурная модель сферопластика

При определении состояния среды рассматриваются каждая микросфера и ее «соседи» – близкорасположенные микросферы, а также граница среды. Координаты всех микросфер определяются в результате моделирования структуры материала с помощью алгоритма Любачевского – Стилинжера при случайном распределении микросфер в конечном объеме. Диаметр сфер и толщина их стенок моделируются через вероятностные распределения, полученные по результатам опытных исследований.

Напряженное состояние микросфер в структурной модели определяется как суперпозиция решений группы более простых задач, имеющих аналитическое решение. Используются решения задач линейной теории упругости об НДС двухслойных сферических включений [7]. В данной работе предлагается к этой системе добавить группу задач об НДС микросферы вблизи воздушной поры, а также НДС внутренней поверхности пор. Для этого выполнен переход от полученных аналитических решений для включений к задачам с воздушными порами, «убирая» из включений жесткость материала.

С точки зрения микроструктуры, воздушные поры, дефектные и разрушенные микросферы представляют области локальной податливости в среде, которые под действием внешнего гидростатического давления могут быть подвержены наполнению водой или полному/частичному смятию. Такие области несут незначительно малую структурную нагрузку. Оба процесса разрушения сопровождаются чрезмерным деформированием локальной области.

В модели воздушные поры и дефекты рассматривались в явном виде, как элементы микроструктуры. Поры сферической формы, распределенные равномерно, хаотично, по объему структуры; пересечения воздушных пор с микросферами или про-

никновения микросфер в поры не были предусмотрены. Размеры пор имели один порядок с размером микросфер. Предложено распределить влияние наличия пор, дефектных и разрушенных микросфер на: а) влияние на напряженное деформированное состояние микросфер в локальной области вблизи пор; б) влияние на эффективные упругие характеристики глобальной среды СФП.

В структурной модели результаты расчета НДС сфер и эффективных характеристик среды СФП завязаны друг на друга, поэтому это разделение имеет смысл только для описания схемы работы и записи соотношений, по которым пошагово происходит оценка прочности и накопления повреждений в алгоритмах модели. Методика гомогенизации характеристик СФП и результаты расчетов представлены в статье [14].

Рассмотрим пример вычисления НДС для сферы, находящейся во взаимодействии с близкорасположенными сферами и границами среды. В модели принят следующий подход: напряжения в теле сферы в точке  $p$  с радиус-вектором  $r_p$  определяются путем суперпозиции решений четырех задач:

- одиночная сфера находится в бесконечной изотропной гомогенной среде с эффективными характеристиками;
- сфера находится вблизи соседней сферы  $S_1$ ;
- сфера находится вблизи воздушной поры  $V_1$ ;
- сфера находится вблизи границы  $B_1$ .

В результате решения задач для точки  $p$  в теле сферы определяются напряжения  $\sigma_p^\infty$ ,  $\sigma_p^{S_1}$ ,  $\sigma_p^{V_1}$ ,  $\sigma_p^{B_1}$ . Применяя принцип суперпозиции, напряжения в точке  $p$  рассматриваемой сферы будут определяться следующим выражением:

$$\sigma_p = \sigma_p^\infty + (\sigma_p^{S_1} - \sigma_p^\infty) + (\sigma_p^{V_1} - \sigma_p^\infty) + (\sigma_p^{B_1} - \sigma_p^\infty),$$

где  $\sigma$  – тензор напряжений, который в сферической системе координат имеет вид

$$\sigma \equiv (\sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{r\varphi}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{\varphi\theta}).$$

В случае если сфера окружена множеством ближайших сфер и пор и количество рядом расположенных границ больше одной, то выражение для  $\sigma_p$  может быть переписано к виду:

$$\sigma_p = \sigma_p^\infty + \sum_{i=1}^{i=I} (\sigma_p^{S_i} - \sigma_p^\infty) + \sum_{j=1}^{j=J} (\sigma_p^{B_j} - \sigma_p^\infty) + \sum_{k=1}^{k=K} (\sigma_p^{V_k} - \sigma_p^\infty),$$

где  $I, J, K$  – количество ближайших сфер, границ и воздушных пор соответственно.

Правомерность применения принципа суперпозиции для структурной модели ранее обсуждалась в [8] и будет рассмотрена в данной работе.

Переход от состояния индивидуальных микросфер к глобальным расчетным характеристикам СФП в процессе моделирования представлен в работе [7]. По отношению к данному исследованию важно отметить, что оценка несущей способности производится на каждом шаге нагружения путем определения НДС в ~3400 точках, распределенных равномерно на внешней и внутренней поверхностях каждой микросферы.

На основании этих результатов определяется место на микросфере, обладающее наибольшей концентрацией напряжений, и рассчитывается такое давление на сфероид в целом  $p_{кр}$ , при котором эта микросфера разрушится. В ходе роста внешней нагрузки на СФП в материале накапливаются повреждения, характеристики материала меняются и происходит перераспределение нагрузки по ансамблю микросфер. А значит, НДС микросферы и соответствующее  $p_{кр}$  будет изменяться с ростом внешнего давления.

### Верификация структурной модели с использованием метода конечных элементов

Для верификации структурная модель сравнивалась с результатами КЭ моделирования. Ввиду ограничений КЭ моделей были выбраны структуры материала с 500 сферами, с относительно низкой объемной долей ~57 %.

Такие расчеты потребовали проведения анализа сходимости результатов к качеству «сетки». В моделях использовались элементы типов Solid186 и Shell281 для фаз материала полимерной матрицы и микросфер соответственно. В моделях было более 4 000 000 степеней свободы, т.е. более 1 000 000 узлов. Размеры микросфер соответствуют распределениям ПСМ МС-ВП [7]. Для сравнения расчетных методик толщина стенок микросфер в моделях выбрана единой, равной 1 мкм. Поскольку размеры микросфер, их положение относительно границ объема и друг друга случайны либо варьируются, то допущение о единой толщине стенок сфер не должно сказаться на результате такого сравнительного анализа расчетных методик.

Гетерогенные структуры с локальными областями повышенной податливости требуют внимательного отношения к выбору методики приложения граничных условий (ГУ) гидростатического давления. В работе с КЭ моделями в соответствии

с классическим подходом рассматривались два вида ГУ. Для первого на внешних гранях модели реализовано заданное поле нормальных перемещений, и таким образом получены модели жесткого ГУ (Ж-ГУ). Для второго вида на внешние поверхности прикладывалось нормальное давление, т.е. мягкое ГУ (М-ГУ).

Для обоих видов ГУ решены серии задач для определения НДС элементов микроструктуры. В некоторых расчетах рассматривались модели, учитывающие упругопластический тип деформирования. Указанный подход к сравнению результатов с КЭ моделированием совпадает с выбранным в статье о гомогенизации характеристик СФП [14].

### Статистический анализ напряженного состояния микроструктуры сфероидов

Суть подхода оценки НДС СФП с большими группами сфер заключается в следующем. У каждой сферы в расчете оценивался наиболее опасный концентратор напряжений и собирался массив таких величин на основе данных обо всех сферах.

Такой массив данных об НДС сфер создан для моделей при различных величинах внешнего нагружения, с учетом особенностей физико-механических характеристик компонент СФП. В обработке результатов также использовано соответствие между концентратором напряжения сферы и ее объемом – для оценки объемного содержания областей, подверженных эффекту разрушения сфер.

Для анализа распределений использовались две оценки вариации: стандартное и среднее отклонения ( $\sigma$  и  $\Delta$  соответственно):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad \Delta = \frac{1}{n} \sum |x - \bar{x}|,$$

где  $x$  – член массива,  $\bar{x}$  – математическое ожидание или среднее,  $n$  – размер массива.

### Расчетные исследования

#### Calculation studies

Результаты структурной модели и КЭ моделирования для задач с относительно небольшим числом элементов микроструктур (500 шт.) показаны в табл. 2 и на рис. 1. Величина моделируемого гидростатического давления  $P$  была взята равная 1 МПа для удобства масштабирования результатов, сформулированных в упругой постановке. Физико-механические характеристики компонент структу-

**Таблица 1.** Расчетные характеристики материалов  
**Table 1.** Design characteristics of materials

Характеристика	$\rho$	$E$	$\nu$	$\sigma_c^R$
Размерность	кг/м <sup>3</sup>	ГПа	–	МПа
Натрийборосиликатное стекло	2600	65,0	0,20	3000
Полимерная матрица на основе эпоксидного связующего	1140	4,7	0,35	178

ры, используемые в расчетах стекла микросфер и полимерной матрицы указаны в табл. 1.

Видно, как модели показывают отличную сходимость результатов. Средние значения распределений (мат. ожидание) и характеристики вариации в полученных массивах концентраторов напряже-

**Таблица 2.** Свойства распределений напряжений конечно-элементной и структурной моделей

**Table 2.** Properties of stress distributions of finite element and structural models

	Структурная модель	КЭ модель
Среднее, МПа	-6,42	-6,48
Стандартное отклонение ( $\sigma$ ), МПа	1,35	1,33
Среднее отклонение ( $\Delta$ ), МПа	1,01	1,06



**Рис. 1.** Сравнение распределений напряжений для конечно-элементной и структурной моделей

**Fig. 1.** Comparison of stress distributions between finite element and structural models

ний отличаются меньше чем на 5 %. Выбор вида ГУ для КЭ моделирования не приводит к значимым изменениям в результатах при отсутствии в структуре пор и неупругих эффектов.

Далее перейдем к моделированию структур с воздушными порами. На рис. 2 и в табл. 3 показаны распределения концентраторов напряжений сфер при наличии пор. Сопоставление результатов из табл. 2 и 3 дает возможность оценить влияние добавления пор на характеристики НДС микросфер. Для моделей без пор величина стандартного отклонения составляет около 20 % от среднего. При добавлении пор в модели материала наряду с ростом среднего напряжения (с 6,42 МПа до 10,41 МПа при  $P = 1$  МПа) увеличиваются абсолютные и относительные отклонения. Стандартное отклонение для результатов всех моделей превышает 25 % от математического ожидания при наличии пор.

На распределениях с рис. 2 видно, как результаты для КЭ модели с мягким ГУ обладают наибольшей дисперсией. Результаты структурной модели ближе к результатам КЭ модели с жесткими ГУ. Здесь необходимо отметить, что разница в математическом ожидании между результатами структурной модели и КЭ модели Ж-ГУ не превышает 5 %. Предполагается, что эффект разницы между выбором ГУ должен снижаться при увеличении размера рассматриваемого объема и числа сфер соответственно, т.к. доля сфер, расположенных рядом с границами объема, будет закономерно снижаться.

В то же время разрушение материала под давлением зарождается на внешних поверхностях, а значит, велика важность НДС сфер вблизи границ материала, при этом наиболее реалистичным методом описания ГУ в КЭ моделях является мягкий метод нагружения, но для этого объем исследуемой области должен значительно превышать рассматриваемые постановки.

Серия расчетов КЭ моделей показала, что выбор ГУ проявляется в результатах НДС сфер при добавлении в структуру воздушных пор. И без них, при относительно равномерном распределении жесткостей по объему, он незначителен.

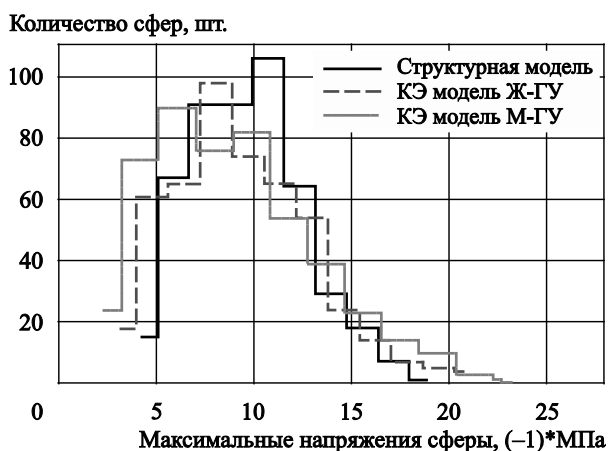
Далее перейдем к рассмотрению нелинейных эффектов деформирования структуры сферопластика. При создании СФП могут использоваться различные полимерные материалы для матрицы, изготавливаемые на основе эпоксидных смол. В зависимости от химического состава и технологии изготовления, этот материал может в той или иной степени проявлять эффекты вязкоупруго-пластического деформирования.

Результаты экспериментов на одноосное сжатие показали, что используемые марки материала полимерной матрицы демонстрируют переход к пластическому течению при давлении, превышающем 125 МПа. На основе МКЭ исследовано влияние нелинейного деформирования матрицы на прочностные характеристики СФП под действием гидростатического давления. Для анализа применялась модель изотропного/кинематического билинейного пластического упрочнения с пределом текучести 75 МПа. Для описания пластического течения использована касательная жесткость в 10 раз ниже жесткости на упругом участке деформирования материала.

Результаты расчетов показали, что влияние нелинейных характеристик проявляется только при наличии в структуре воздушных пор. Моделирование упругопластического поведения материала матрицы при наличии пор в структуре начинает влиять на эффективные модули объема материала при низких уровнях давления. А при отсутствии пор нелинейные эффекты в связующем остаются незаметными даже при высоких уровнях давления [14].

На рис. 3а представлено сравнение распределений концентраторов напряжений для двух КЭ моделей, в которых нет пор. Между такими решениями средние величины и стандартное отклонение отличаются менее чем на 1 %. За величину гидростатического давления взята величина  $P = 100$  МПа, близкая к давлению потери плавучести СФП рассматриваемой марки С-6Г.

Влияние нелинейного деформирования связующего на НДС микросфер при наличии большой доли пор показано на рис. 3б и в табл. 3. При моделировании давления  $P = 100$  МПа в микро-



**Рис. 2.** Сравнение распределений напряжений для структурной и конечно-элементной моделей с различными граничными условиями при  $\sim 20$  % объемной доли пор и  $P = 1$  МПа

**Fig. 2.** Comparison of stress distributions between finite element and structural models with different boundary conditions at  $\sim 20$  % porosity by volume and  $P = 1$  MPa

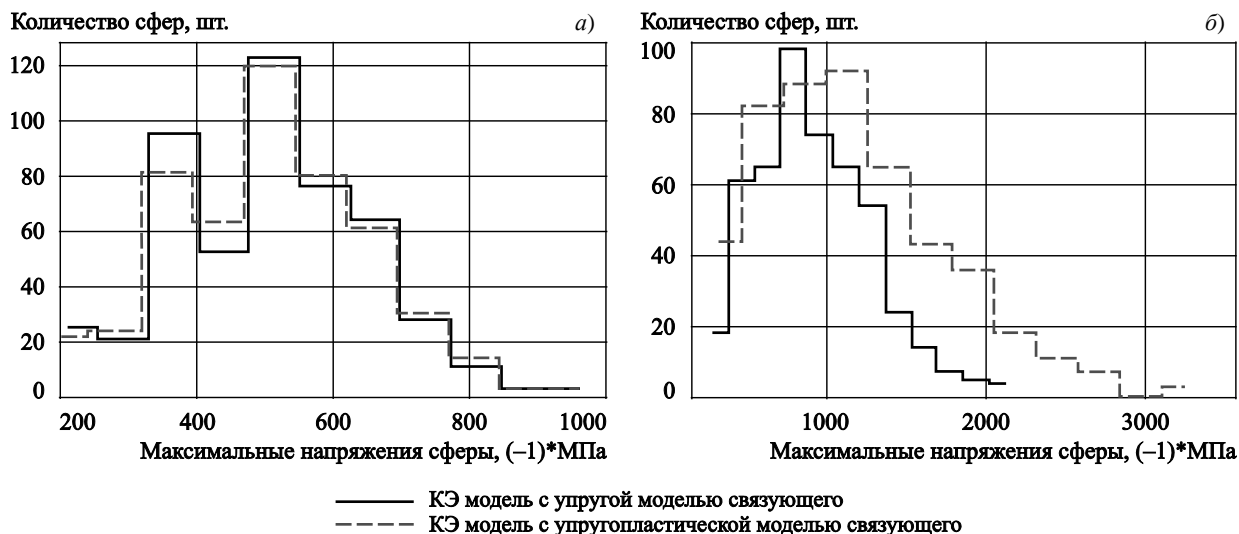
структуре распространены области локальной пластической деформации материала матрицы. Среднее напряжение увеличивается на  $\sim 30$  %, и отклонения от среднего также значительно растут. Наблюдаемая на рис. 3б разница между результатами моделей начинает проявляться при относительно низких величинах давления  $P > 20$  МПа и коррелирует с результатами расчета эффективных модулей [14].

При отсутствии в структуре пор, дефектов и разрушенных сфер структурная модель хорошо коррелирует с КЭ моделированием по распределениям напряжений в сферах. Значительное отличие между расчетными моделями появляется при одно-

**Таблица 3.** Свойства распределений концентраторов напряжений структурной модели и конечно-элементных моделей с различными граничными условиями при  $\sim 20$  % объемной доли пор

**Table 3.** Properties of stress raisers in structural and finite element models with different boundary conditions at  $\sim 20$  % porosity by volume

	Упругая модель деформирования связующего, $P = 1$ МПа		Упругопластическая модель связующего, $P = 100$ МПа	
	Структурная модель	КЭ модель Ж-ГУ	КЭ модель М-ГУ	КЭ модель Ж-ГУ
Среднее, МПа	-10,41	-10,15	-9,89	-1304
Стандартное отклонение ( $\sigma$ ), МПа	2,89	3,65	4,23	579
Среднее отклонение ( $\Delta$ ), МПа	2,36	2,93	3,42	460



**Рис. 3.** Результаты конечно-элементных расчетов:  
 а) при отсутствии пор; б) при наличии 20 % пор при гидростатическом давлении  $P = 100$  МПа

**Fig. 3.** Results of finite element calculations:  
 а) without porosity; б) with 20 % porosity at hydrostatic pressure  $P = 100$  MPa

временном моделировании нелинейного деформирования матрицы и значительной объемной доле воздушных пор.

## Анализ напряжений для групп микросфер различных размерных распределений

Analysis of stresses for micro sphere groups of various dimensional distribution

В работе над улучшением характеристик сферопластика ведется расчетное исследование влияния гранулометрического состава ПСМ и распределения плотности сфер на эффективные свойства СФП. В результате планируется выпуск научной статьи с более подробным описанием исследования.

В данной работе используются различные модели микросфер и показаны соответствующие им расчетные распределения напряжений для микросфер в составе структуры СФП. Приведем описание пяти рассматриваемых моделей микросфер:

- микросферы на основе исходного распределения размеров/плотностей ПСМ марки МС-ВП;
- микросферы с единой плотностью и исходным распределением размеров;
- микросферы с единым размером и плотностью;
- микросферы, собранные из двух групп с единой плотностью, обладающих размерами  $d_s =$

$= 30$  мкм и  $d_L = 60$  мкм в пропорции объемов 1 к 3;

- микросферы, собранные из двух групп с единой плотностью, обладающих размерами  $d_s = 30$  мкм и  $d_L = 90$  мкм в пропорции объемов 1 к 3.

На рис. 4а приведены распределения напряжений двух моделей. Первая основана на исходных распределениях размеров и плотностей/толщин стенок. Для второй модели используется идеализированное распределение толщин стенок и плотностей, приводящее к значительному повышению прочности сфер. Для обеих моделей можно отметить, что основной объем сфер ( $> 80\%$ ) занимает узкую область в распределениях напряжений и характеризуется относительно низкими напряжениями ( $< 15$  МПа при внешнем давлении  $P = 1$  МПа). При детальном рассмотрении (рис. 4б) видно, как для модели единой плотности полностью отсутствуют доли высоконапряженных сфер с концентраторами напряжений выше 30 МПа. При расчетах первой модели эта группа сфер разрушается вначале и приводит к общему снижению прочности СФП. Этот эффект можно наблюдать на рис. 5.

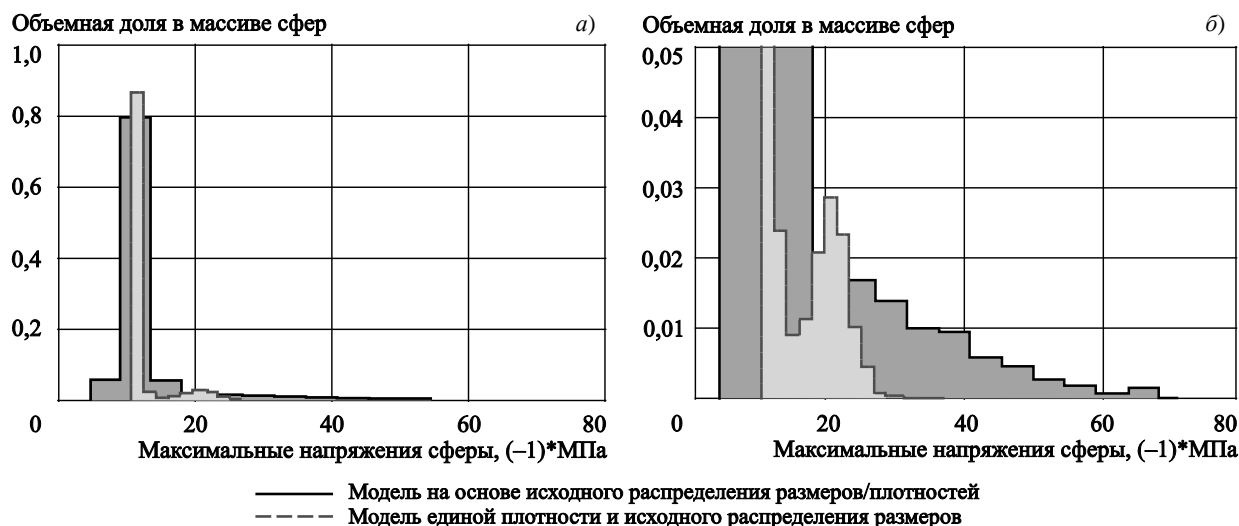
При анализе распределений напряжений важно помнить о расчетной величине прочности материала стекла  $\sigma_c^R = 3000$  МПа. Очевидно, что доли микросфер с напряжениями выше 30 МПа оказываются полностью разрушены при достижении внешнего давления  $P = 100$  МПа. А при давлении

$P = 50$  МПа – разрушены сферы с напряжениями выше 60 МПа.

В первой модели к моменту наступления давления  $P = 100$  МПа успевает произойти полное разрушение, включающее в себя больше половины всех сфер. Наименее прочные сферы в ансамбле разрушаются задолго до достижения критического давления всего материала. На диаграммах это мо-

жет быть отмечено в снижении плавучести после преодоления давления  $P = 50$  МПа (рис. 5б). Для модели единой плотности, которая лишена доли сфер с напряжениями выше 30 МПа, расчетные диаграммы нагружения показывают начало снижения плавучести только после 115 МПа.

Здесь и далее в моделях использовались группы из 50 000 сфер, структурные модели СФП плотно-



**Рис. 4.** Сравнение распределений напряжений для микросфер в составе сферопластика при давлении  $P = 1$  МПа; представлены два масштаба диаграммы – (а) и (б)

**Fig. 4.** Comparison of stress distributions for micro spheres in SF under pressure  $P = 1$  МПа; two diagram scales are given – (a) and (b)



**Рис. 5.** Сравнение диаграмм нагружения для сферопластика; диаграммы деформирования  $\theta$  (а) и плавучести  $q$  (б) с ростом давления  $P$

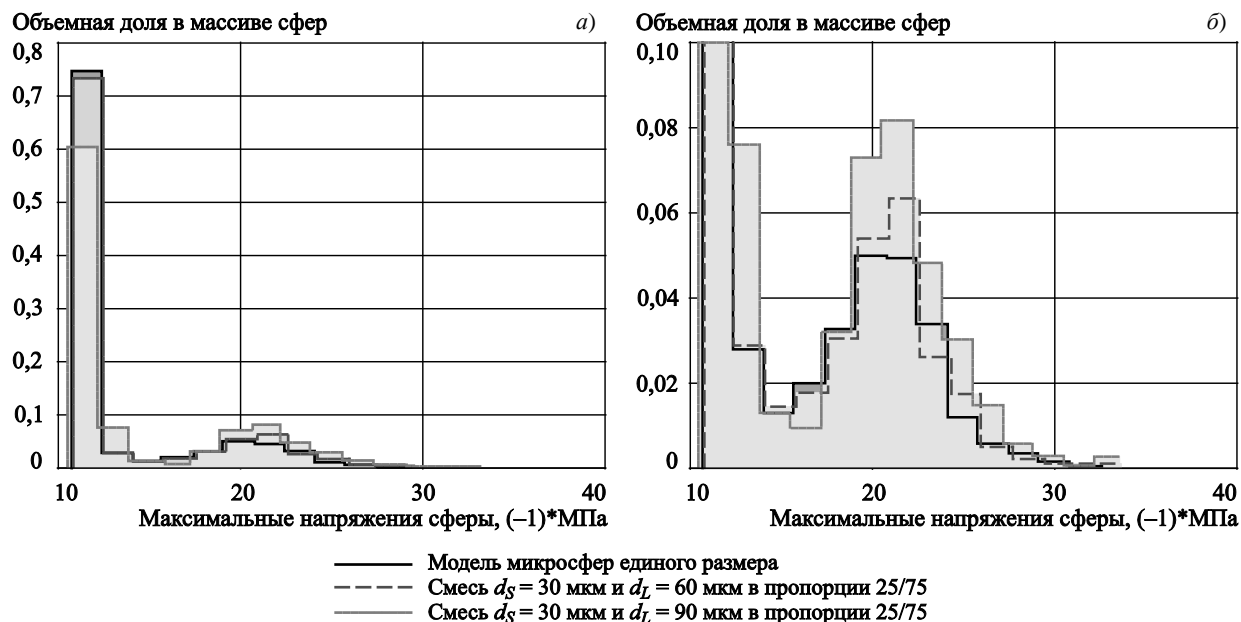
**Fig. 5.** Comparison of loading diagrams for SF: diagrams of deformation  $\theta$  (a) and buoyance  $q$  (b) with a pressure increase  $P$



сти  $600 \text{ кг/м}^3$  обладают высоким КЗО микросфер, превышающим 60 %.

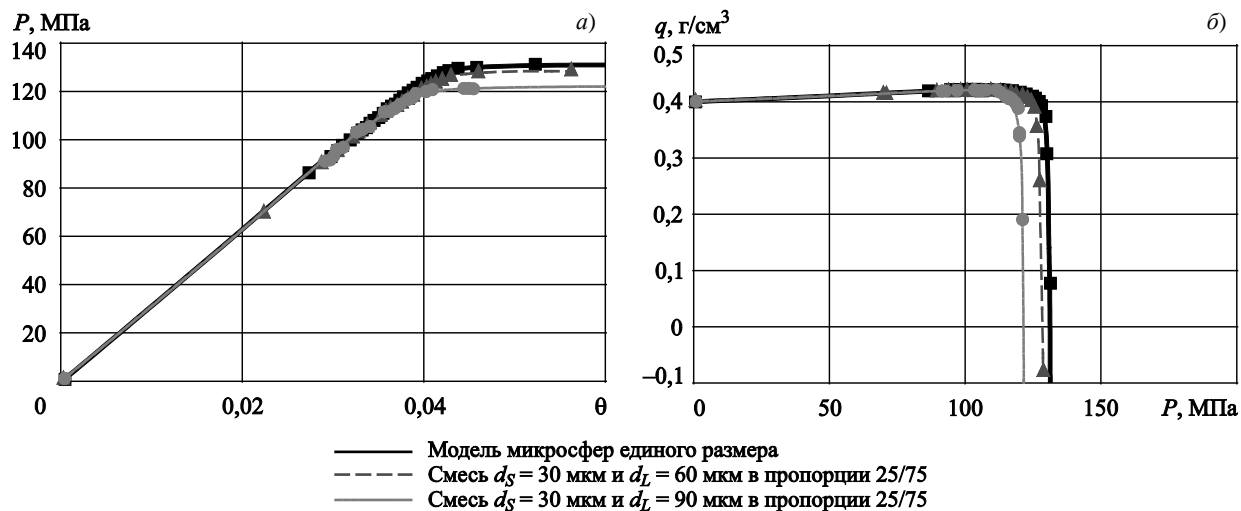
На рис. 6 показано сравнение распределений напряжений для трех моделей микросфер, отличающихся только различиями в комбинациях разме-

ров. Плотность для всех моделей близка к единой. Представленный результат демонстрирует влияние размерных характеристик на расчетную прочность СФП. Выбор более широкого диапазона размеров ( $d_S = 30 \text{ мкм}$  и  $d_L = 90 \text{ мкм}$ ) приводит к понижению



**Рис. 6.** Сравнение распределений напряжений для микросфер в составе сферопластика при давлении  $P = 1 \text{ МПа}$ ; представлены два масштаба диаграммы – (а) и (б)

**Fig. 6.** Comparison of stress distributions for micro spheres in SF under pressure  $P = 1 \text{ МПа}$ ; two diagram scales are given – (a) and (b)



**Рис. 7.** Сравнение диаграмм нагружения структурных моделей; диаграммы деформирования  $\theta$  (а) и плавучести  $q$  (б) с ростом давления  $P$

**Fig. 7.** Comparison of loading diagrams in structural models; diagrams of deformation  $\theta$  (a) and buoyancy  $q$  (b) with a pressure increase  $P$

расчетной прочности, но разница в диаграммах нагружения между этими моделями не превышает 15 % при оценке давления потери плавучести СФП (рис. 7а и 7б). Из представленных диаграмм видно, что для различных моделей характерные особенности распределений напряжений коррелируют с расчетной прочностью СФП.

## Заключение

### Conclusion

В данной работе предложено рассмотреть распределения напряжений микросфер в составе сферопластика в роли качественной оценки расчетных методик. Разработанная структурная модель СФП позволяет оценивать напряженное состояние ее компонент под внешней гидростатической нагрузкой для статистически значительного числа микросфер. Результаты показывают отличную сходимость НДС с расчетами детализированных КЭ моделей.

Используя точные данные об НДС микроструктуры материала, структурная модель прогнозирует развитие повреждений, рассчитывает процесс разрушения вплоть до полной потери плавучести материала. При варьировании моделей микросфер, свойств компонент СФП и глобальных характеристик материала расчет структурной модели может показывать значительные изменения в результатах. Ввиду очевидной сложности устройства методики расчета структурной моделью получаемые результаты эффективных прочностных характеристик создают трудности при попытке их интерпретировать.

Предлагаемый в работе метод оценки распределений концентраторов напряжений позволяет лучше понять моделируемые процессы, хотя и не дает полного объяснения результатов. Сравнения распределений напряжений использовано в работе для расчетов СФП на основе нескольких моделей микросфер. Статистическая оценка напряжений позволила выявить характерные особенности ансамблей микросфер и их влияние на свойства СФП.

Вопрос влияния нелинейных характеристик компонент СФП на НДС микроструктуры остается открытым для разработанной структурной модели. При отсутствии в микроструктуре пор, дефектов и разрушенных сфер данная модель отлично коррелирует с результатами МКЭ. Эффекты, зафиксированные при моделировании нелинейных характеристик матрицы, возникают только при большой объемной доле областей повышенной деформативности (высокой податливости).

В свою очередь, в реальных образцах и конструкциях из СФП такие области не присутствуют либо должны быть минимизированы. Во-первых, доля относительной пористости ограничена нормативами для производства блоков плавучести из сферопластика: не допускаются к эксплуатации материалы с заметной поистостью, превышающей единицы процентов.

Во-вторых, испытания образцов марок СФП под действием гидростатического давления свидетельствуют о том, что области с поврежденными, разрушенными микросферами возникают незадолго до полного разрушения образцов. При лабораторных испытаниях образцы демонстрируют свойства хрупкого разрушения, при котором набор давления замедляется на высоком уровне – около 90 % от давления полной потери плавучести образца. О высоком пороге нагрузки начала разрушения сфер также свидетельствуют низкие величины водопоглощения при испытаниях на продолжительную выдержку образцов под давлением. Такие результаты указывают на высокое качество используемых марок ПСМ и СФП на их основе.

## Список использованной литературы

1. Applications of polymer matrix syntactic foams / *N. Gupta, S.E. Zeltmann, V.C. Shunmugasamy, D. Pinnisetty* // *Journal of Metals*. 2014. Vol. 66, № 2. P. 245–254. DOI: 10.1007/s11837-013-0796-8.
2. Syntactic foams formulations, production techniques, and industry applications: a review / *L.O. Afolabi, Z.M. Ariff, S.F.S. Hashim* [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9, № 5. P. 10698–10718.
3. *Shutov F.A.* Syntactic polymer foams // *Chromatography, Foams, Copolymers*. Berlin : Springer, 1986. P. 63–124. (*Advances in Polymer Science* ; Vol. 73/74). DOI: 10.1007/3-540-15786-7\_7.
4. Failure of glass-microballoons/thermoset-matrix syntactic foams subject to hydrostatic loading / *L. Bardella, G. Perini, A. Panteghini* [et al.] // *European Journal of Mechanics. A/Solids*. 2018. Vol. 70. P. 58–74. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2018.01.007.
5. Micromechanical modelling of syntactic foam / *D. Carolan, A. Mayall, J.P. Dear, A.D. Fergusson* // *Composites. Part B: Engineering*. 2020. Vol. 183. P. 107701 (10 p.). DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107701.
6. A micromechanical model to study failure of polymer-glass syntactic foams at high strain rates / *A. Shams, A. Panteghini, L. Bardella, M. Porfiri* // *Computational Materials Science*. 2017. Vol. 135. P. 189–204.

7. Федонюк Н.Н., Додонов П.А. Структурная модель деформирования и разрушения гетерогенных материалов типа сферопластика при действии гидростатического давления // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Вып. 2(396). С. 37–51. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-37-51.
8. Исследование влияния характеристик и взаимного расположения сферических включений на напряженное состояние среды / Н.С. Берденников, П.А. Додонов, А.В. Задумов, Н.Н. Федонюк // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2020. Спец. вып. 1. С. 101–107. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-101-107.
9. Додонов П.А., Рыжкин А.Е. Расчетное исследование устойчивости микросфер в структуре сферопластика при всестороннем сжатии // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Спец. вып. 2. С. 119–124. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-119-124.
10. Додонов П.А., Федонюк Н.Н. Моделирование структуры полимерного композиционного материала, армированного полыми стеклянными микросферами // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Вып. 2(392). С. 71–78. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-71-78.
11. Кржечковский П.Г. Микромеханика деформирования и разрушения сферопластиков : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 01.02.04. Новосибирск, 1992. 31 с.
12. Liu G. Novel test method for the hydrostatic properties of syntactic foams // Results in Materials. 2019. Vol. 1. P. 100010 (6 p.). DOI: 10.1016/j.rinma.2019.100010.
13. Gupta N., Ye R., Porfiri M. Comparison of tensile and compressive characteristics of vinyl ester/glass microballoon syntactic foams // Composites. Part B: Engineering. 2010. Vol. 41, № 3. P. 236–245. DOI: 10.1016/j.compositesb.2009.07.004.
14. Додонов П.А. Эффективные свойства гетерогенного материала типа сферопластик при наличии пористости и поврежденной структуры // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Вып. 1(399). С. 65–74.
- under hydrostatic pressure // Transactions of the Krylov State Research Centre. Vol. 2(396). P. 37–51. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-2-396-37-51 (in Russian).
4. Investigation into influence of characteristics and mutual distribution of spherical inclusions on stressed state of medium / N.S. Berdennikov, P.A. Dodonov, A.V. Zadumov, N.N. Fedonyuk // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. Special Edition 1. P. 101–107. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-101-107 (in Russian).
5. Dodonov P.A., Ryzhkin A.E. Calculation study on micro sphere stability in syntactic foam structure under hydrostatic compression // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. Special Edition 2. P. 119–124. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-S-I-119-124 (in Russian).
6. Dodonov P.A., Fedonyuk N.N. Modeling of the structure of a polymer composite material reinforced with hollow glass micro spheres // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. Vol. 2(392). P. 71–78. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-71-78 (in Russian).
7. Krzhechkovsky P.G. Micro mechanics of syntactic foam deformation and damage. Author's D.Sc. abstract: 01.02.04. Novosibirsk, 1992. 31 p. (in Russian).
8. Liu G. Novel test method for the hydrostatic properties of syntactic foams // Results in Materials. 2019. Vol. 1. P. 100010 (6 p.). DOI: 10.1016/j.rinma.2019.100010.
9. Gupta N., Ye R., Porfiri M. Comparison of tensile and compressive characteristics of vinyl ester/glass microballoon syntactic foams // Composites. Part B: Engineering. 2010. Vol. 41, no. 3. P. 236–245. DOI: 10.1016/j.compositesb.2009.07.004.
10. Dodonov P.A. Efficient properties of a syntactic foam heterogeneous material with porosity and structural damage // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021. Vol. 1(399). P. 65–74 (in Russian).

## References

1. Micromechanical modelling of syntactic foam / D. Carolan, A. Mayall, J.P. Dear, A.D. Fergusson // Composites. Part B: Engineering. 2020. Vol. 183. P. 107701 (10 p.). DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107701.
2. A micromechanical model to study failure of polymer-glass syntactic foams at high strain rates / A. Shams, A. Panteghini, L. Bardella, M. Porfiri // Computational Materials Science. 2017. Vol. 135. P. 189–204.
3. Fedonyuk N.N., Dodonov P.A. Structural model of deformation in heterogeneous materials of syntactic foam type

---

## Сведения об авторе

Додонов Павел Анатольевич, инженер 1-й категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: dodonovpavel@gmail.com.

## About the author

Pavel A. Dodonov, Engineer 1<sup>st</sup> Category, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: dodonovpavel@gmail.com.

Поступила / Received: 21.12.21  
Принята в печать / Accepted: 04.05.22  
© Додонов П.А., 2022