Морфология и свойства полых стеклянных микросфер.

Часть 3. О толщине стенок промышленных полых стеклянных микросфер.

Morphology and properties of hollow glass microspheres.

Part 3. On the wall thickness of industrial hollow glass microspheres.

А.Я. ГОРЕНБЕРГ*, А.Н. ТРОФИМОВ**, В.Г. ИВАНОВА-МУМЖИЕВА*,
Л.В. ПЛЕШКОВ**, А.В. БАЙКОВ**

A.YA. GORENBERG, *A.N. TROFIMOV **, V.G. IVANOVA-MUMZHIEVA *,
L.V. PLESHKOV**, A.V. BAIKOV **

*Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, **АО «НПО Стеклопластик»

*Semenov Institute of Chemical Physics, **NPO Stekloplastic
marinanv61@mail.ru

Методом микроскопического анализа фрагментов разрушенных полых стеклянных микросфер проведены исследования по определению толщины их стенок. Определено, что толщина стенки промышленных микросфер может существенно варьироваться даже в пределах одной микросферы. Показано, что с увеличением диаметра полых стеклянных микросфер относительная толщина стенки уменьшается, а степень её разнотолщинности увеличивается. Переменная толщина стенки приводит к значительному снижению, по сравнению с расчетным, уровня критического давления, вызывающего разрушение микросфер.

Ключевые слова: полые стеклянные микросферы, микрофотография, диаметр, толщина, разнотолщинность, фрагмент, поверхность разрушения, синтактовый композит, плотность, прочность, устойчивость

Microscopic analysis of fragments of destroyed hollow glass microspheres was used to determine the thickness of their walls. It is revealed that the wall thickness of industrial microspheres can vary significantly even within a single glass microsphere. It is shown that as the diameter of hollow glass microspheres increases, the relative wall thickness decreases, and the degree of their heterogeneity increases. The wall thickness variability leads to a significant decrease in the level of critical pressure, which causes the destruction of microspheres, compared to the calculated one.

Keywords: Hollow glass microspheres, microphotography, diameter, thickness, thickness difference, fragment, fracture surface, syntactic composite, density, strength, stability

DOI: 10.35164/0554-2901-2021-3-4-32-36

Введение

Среди огромного количества промышленных полых стеклянных микросфер (ПСМ) даже в пределах одной, одновременно нарабатанной, партии сложно найти микросферы абсолютно правильной сферической формы, одного размера и с одинаковой толщиной стенки [1–6]. Более того, практически у каждой конкретной микросферы толщина стенки тоже величина не постоянная [7, 8]. Следовательно, геометрические параметры (морфология) ПСМ и их свойства не могут быть однозначно детерминированы и определяются только законами распределения их вероятностей. При этом все вышеперечисленные геометрические характеристики полых стеклянных микросфер связаны стохастическими зависимостями, которые, в свою очередь, определяются вариативностью параметров технологического процесса формования ПСМ [9, 10]. Эти сложные взаимосвязи до сих пор не позволяют разработать стохастическую математическую модель, с помощью которой можно было бы прогнозировать поведение синтактовых композитов при различных видах нагружения. Одним из необходимых условий решения этой комплексной проблемы является определение степени неоднородности толщины стенки промышленных ПСМ, а также исследование взаимосвязи этой неоднородности с диаметром и прочностью полых стеклянных микросфер. В доступной научно-технической литературе не удалось найти результатов исследования, относящихся к этой области материаловедения.

Принято считать, что основным параметром, определяющим физические свойства микросфер, является их плотность, которая, в свою очередь, определенным образом зависит от размеров (диаметра)

ПСМ и толщины их стенок [2, 6, 11, 12]. Однако существует еще один фактор, который в решающей степени определяет прочность ПСМ – это вариативность толщины стенки каждой отдельно взятой микросферы. К сожалению, влияние этого фактора на механические характеристики ПСМ и композитов на их основе практически не изучалось. Основная причина этого заключается в сложности экспериментальных исследований по определению толщины стенок полых микросфер. В настоящей работе предпринята попытка на основе разработанной методики определить вариативность толщины стенок промышленных полых стеклянных микросфер.

Методика определения толщины стенок полых стеклянных микросфер

Определить среднюю (обобщенную) толщину стенки полых стеклянных микросфер той или иной марки можно простым расчетным путем. Для этого необходимо определить усредненные значения внешнего ($R_{\text{внеш}}$) и внутреннего ($R_{\text{внутр}}$) радиусов полых микросфер. Определение среднего значения внешнего диаметра ($D_{\text{внеш}}$), а, следовательно, и величины среднего радиуса ПСМ данной выборки, можно произвести различными лабораторными методами [1], но усредненное значение внутреннего диаметра ($D_{\text{внутр}}$) полых микросфер можно определить только расчетным путем по следующей формуле:

$$D_{\text{внутр}} = \sqrt[3]{\frac{D_{\text{внеш}}^3 (\gamma_{\text{ст}} - \gamma_{\text{псм}})}{\gamma_{\text{ст}}}}, \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{псм}}$ – усредненная истинная плотность микросфер данной выборки; $\gamma_{\text{ст}}$ – плотность стекла.

В качестве примера рассчитаем среднюю толщину стенки микросфер марки МС-ВП А9 третьей группы с истинной плотностью $0,3 \text{ г/см}^3$. Пусть средний диаметр, определенный по положению медианы на графике кривой весового распределения этих микросфер по диаметру, составляет около 65 мкм , а плотность стекла равна $2,55 \text{ г/см}^3$. Подставив значения этих показателей в формулу (1), определяем внутренний диаметр микросфер: $D_{\text{внутр}} \approx 62,3 \text{ мкм}$. Следовательно, расчетная средняя толщина стенки для микросфер этой марки будет равна $1,35 \text{ мкм}$. При этом предполагается, что определенная таким образом толщина стенки – это некая обобщенная величина для всего огромного многообразия ПСМ данной марки. Также предполагается, что толщина стенки постоянна в пределах каждой конкретной микросферы. Однако на практике все оказывается гораздо сложнее, поскольку у промышленных полых стеклянных микросфер толщина стенки в разных её местах может существенно различаться. Очевидно, что разнотолщинность стенки ПСМ является одним из основных факторов, определяющих механические свойства как самих полых микросфер, так и композитов на их основе. К сожалению, оценить степень вариативности толщины стенки ПСМ расчетным путем невозможно.

Рис. 1. Фрагмент полый стеклянной микросферы с переменной толщиной стенки [6].

Измерение реальной толщины стенки полых микросфер, а тем более – определение степени неоднородности этой толщины – это методически сложные экспериментальные исследования. На сегодняшний день существует только один применимый на практике способ, позволяющий относительно точно производить замеры изменения толщины стенки для конкретной полый стеклянной микросферы. Суть этого метода заключается в компьютерном анализе электронных микрофотографий поверхностей разрушения (сколов) фрагментов разрушенных ПСМ. Авторы работы [7], используя снимки с электронного микроскопа фрагмента разрушенной полый стеклянной микросферы, предприняли попытку приблизительно замерить толщину этого фрагмента в различных его местах (рис. 1).

Основная сложность при выполнении подобных исследований состоит в выборе таких фрагментов микросфер, которые позволяют провести замеры толщины их стенки по максимально возможной длине дуги. Кроме этого, необходимо выполнение еще двух условий. Во-первых, анализируемая поверхность разрушения (плоскость скола) должна быть максимально близка к экваториальной плоскости микросферы. Во-вторых, угол между анализируемыми поверхностями и плоскостью изображения должен быть минимальным. Выполнение этих условий позволяет не только с достаточно высокой точностью определить диаметр исходной микросферы, но и определить вариативность толщины её стенки.

Из представленных на рис. 1 данных видно, что у анализируемого фрагмента разница между максимальным и минимальным значениями толщины весьма значительна и составляет $0,6 \text{ мкм}$. Следовательно, можно предположить, что разнотолщинность стенки данной микросферы должна составлять не менее $0,6 \text{ мкм}$. Однако этот вывод нельзя считать однозначным. Дело в том, что анализируемый участок этого фрагмента (поверхность скола) расположен под некоторым углом к направлению сканирования и находится на значительном расстоянии от экваториальной плоскости данной микросферы (рис. 1). Очевидно, что такое, не самое удачное пространственное расположение фрагмента существенно осложняет, а при небольших размерах фрагмента делает просто невозможным

определение его реальной толщины. Кроме этого, относительно небольшая площадь анализируемого фрагмента (заметно меньше 50% от площади поверхности исходной микросферы) привносит дополнительную неопределенность при определении толщины стенки и не позволяет с необходимой точностью замерить истинный диаметр исходной микросферы.

В последние годы в АО «НПО Стеклопластик», совместно с ИХФ РАН им. Н.Н. Семёнова, был проведен большой комплекс исследований морфологии полых стеклянных микросфер. В том числе, были проведены исследования по определению толщины стенки промышленных ПСМ марки МС-ВП А9 2гр. В качестве исходных образцов использовались эпоксидные синтактовые композиты с содержанием микросфер 30% объёмных. На образец синтактового материала наносился неглубокий надрез, затем образец охлаждался в жидком азоте и разрушался. После предварительного микроскопического анализа разрушенной поверхности на ней выбирались области, позволяющие провести замеры толщины стенки микросфер. Для последующего детального анализа на выбранном участке отбирались и нумеровались только те микросферы, разрушение которых, хотя бы частично, произошло по плоскости, близкой к экваториальной, а размеры выбранных фрагментов позволяли определять диаметр исходных ПСМ. При анализе относительно небольших фрагментов диаметр микросфер определялся расчетным путем по длине хорды и высоте дуги сечения.

Очевидно, что длина дуги поперечного сечения (скола), доступная для измерений, должна быть достаточной для того, чтобы произвести не менее десяти замеров толщины стенки с шагом не более 10 мкм . Это позволяет аппроксимировать замеренную разнотолщинность анализируемого участка на всю микросферу. В зависимости от диаметра микросфер и характера их разрушения можно произвести от 10 до 200 замеров толщины стенки. Для отдельных «удачно» разрушившихся микросфер удастся произвести измерение толщины стенки практически по всему периметру скола (рис. 2).

Рис. 2. Фрагмент полый стеклянной микросферы диаметром 82 мкм , позволяющий провести замеры толщины стенки по всему периметру скола: а – исходный фрагмент; б – выделенные участки поверхности скола; в – один из выделенных участков при большом увеличении.

Таблица 1. Результаты исследований по определению размеров полых стеклянных микросфер.

№ образца	Количество измерений	Диаметр D , мкм	Средняя толщина стенки t , мкм	Средняя относительная толщина стенки, t/D	Интервал изменения толщины стенки, мкм	Отклонение толщины стенки от её среднего значения, %
3-4-1	38	20,4	0,470	0,023	$0,37 \leq t \leq 0,57$	21,3
4-1	63	22,3	0,515	0,023	$0,4 \leq t \leq 0,63$	22,3
3-5	70	28,8	0,560	0,019	$0,45 \leq t \leq 0,67$	19,6
3-4-5	91	29,6	0,535	0,018	$0,42 \leq t \leq 0,65$	21,5
8-3	20	32,2	0,740	0,023	$0,68 \leq t \leq 0,8$	8,1
8-2	60	34,4	0,565	0,016	$0,41 \leq t \leq 0,72$	27,4
3-4-4	144	34,6	0,585	0,017	$0,49 \leq t \leq 0,68$	16,2
3-4-6	122	38,5	0,640	0,017	$0,53 \leq t \leq 0,75$	17,2
3-6	107	40,0	0,465	0,012	$0,26 \leq t \leq 0,67$	44,1
8-5	91	42,3	0,630	0,015	$0,48 \leq t \leq 0,78$	23,8
8-7	62	45,4	0,555	0,012	$0,44 \leq t \leq 0,67$	20,7
8-6	119	46,9	0,695	0,015	$0,56 \leq t \leq 0,83$	19,4
3-3	152	47,3	0,710	0,015	$0,58 \leq t \leq 0,84$	18,3
3-1	120	47,7	0,650	0,014	$0,51 \leq t \leq 0,79$	21,5
8-8	54	53,1	0,650	0,012	$0,45 \leq t \leq 0,85$	30,8
8-4	135	54,6	0,720	0,013	$0,59 \leq t \leq 0,85$	18,1
3-4-2	202	55,8	0,960	0,017	$0,86 \leq t \leq 1,06$	10,4
4-3	118	57,7	0,625	0,011	$0,52 \leq t \leq 0,73$	16,8
1-1	56	61,5	0,925	0,015	$0,49 \leq t \leq 1,36$	47,0
8-1	56	63,5	0,705	0,011	$0,57 \leq t \leq 0,84$	19,1
3-2	154	65,3	0,685	0,010	$0,57 \leq t \leq 0,80$	16,8
3-4-3	203	65,4	0,910	0,014	$0,76 \leq t \leq 1,06$	16,5
4-5	150	69,2	0,705	0,010	$0,58 \leq t \leq 0,83$	17,7
3-4-7	106	72,5	0,875	0,012	$0,69 \leq t \leq 1,06$	21,1
3-7	199	81,5	1,085	0,013	$0,86 \leq t \leq 1,31$	20,7
4-2	106	84,6	0,890	0,011	$0,59 \leq t \leq 1,19$	33,7
1-2	126	84,6	0,800	0,009	$0,64 \leq t \leq 0,96$	20,0

Изображение, выбранное для анализа микросферы, увеличивалось до 1000–2000 раз, что позволяет достаточно точно определять её диаметр (рис. 2а). Выбранная для анализа поверхность скола разбивалась на отдельные участки (рис. 2б), изображения которых увеличивались в 10000–20000 раз (рис. 2в). Такого увеличения вполне достаточно для того, чтобы с относительно высокой точностью определить толщину стенки разрушенной микросферы. В рамках проведенного комплекса исследований по вышеописанной методике были отобраны и проанализированы 27 фрагментов промышленных полых стеклянных микросфер марки МС-ВП А9 2гр.

Переходя к обсуждению полученных результатов, необходимо отметить, что использованная методика не позволяет в полной мере оценить истинную (реальную) разнотолщинность стенок полых стеклянных микросфер. Определить реальное изменение толщины стенки для конкретной микросферы можно только в том случае, если её разрушение произошло по экваториальной плоскости, которая расположена строго параллельно линии, соединяющей центры эксцентрично расположенных сферических поверхностей (внутренней и внешней). Другими словами – линия (ось) эксцентриситета должна лежать на экваториальной плоскости скола. К сожалению, вероятность такого разрушения микросферы чрезвычайно мала. Очевидно, что в подавляющем большинстве случаев плоскость разрушения будет находиться под некоторым углом к этой оси эксцентриситета. Если же экваториальная плоскость скола микросферы окажется под прямым углом к оси, то на полученном изображении мы увидим полную микросферу с постоянной толщиной стенки, однако в действительности эта микросфера может иметь весьма существенную разнотолщинность.

Таким образом, реальные отклонения относительной толщины стенки от их среднего расчетного значения для подавляющего большинства проанализированных полых микросфер всегда будут несколько больше.

Результаты проведенных исследований обобщены в таблице 1, в которой замеренные ПСМ расположены в порядке увеличения их диаметра.

Анализ результатов проведенных исследований (таблица 1) подтверждает ранее сделанный вывод [2] о том, что с увеличением диаметра полых стеклянных микросфер среднее значение отно-

сительной толщины стенок (t/D) уменьшается, а, следовательно, уменьшается и их плотность. В то же время, по мере увеличения диаметра ПСМ, заметно увеличивается разнотолщинность их стенки. Очевидно, что оба этих фактора оказывают существенное влияние на прочность полых стеклянных микросфер. Для большей наглядности обобщенные в таблице 1 результаты измерений представлены в виде графической зависимости усредненной толщины стенки микросфер от их диаметра (рис. 3).

Рис. 3. Зависимость толщины стенки микросфер марки МС-ВП А9 2 гр от их диаметра.

Рис. 4. Зависимость относительной толщины стенки полых стеклянных микросфер от их диаметра.

Зависимость, представленная на рис. 3, хорошо аппроксимируется прямой, однако зависимость относительной толщины стенки полых микросфер от их диаметра, по очевидным причинам, не может быть линейной (рис. 4).

На рис. 5 представлено распределение толщины стенки по периметру сечения полый стеклянной микросферы диаметром 32,2 мкм (в таблице №8–3). Как видно, замеренная толщина стенки этой микросферы изменяется в диапазоне от 0,68 до 0,8 мкм. При этом максимальное отклонение толщины стенки от её среднего значения (0,74 мкм) составляет около 10%, а усредненное значение относительной толщины стенки этой микросферы составляет 0,023.

Рис. 5. Распределение толщины стенки полых стеклянных микросфер диаметром 32,2 мкм.

Рис. 6. Распределение толщины стенки полый стеклянной микросферы диаметром 72,5 мкм.

На рис. 6 приведены результаты замеров толщины стенки полый стеклянной микросферы большего диаметра (72,5 мкм). Выбор этой микросферы, также входящей в состав анализируемой промышленной партии ПСМ марки МС-ВП А9 2гр, был определен тем, что характер её разрушения позволял произвести достаточно точные замеры толщины её стенки практически по всему периметру её сечения (в таблице №3–4–7).

Усредненное значение относительной толщины стенки этой микросферы значительно меньше, чем у рассмотренной ранее (рис. 5), и составляет 0,012. Однако при этом толщина стенки этой микросферы варьируется в гораздо больших пределах – от 0,69 до 1,06 мкм. Как следствие, максимальное отклонение толщины стенки от её среднего значения (0,875 мкм) также существенно увеличилось и составляет $\pm 21\%$.

Определив усредненное значение относительной толщины стенки одиночной полый стеклянной микросферы (t/D), можно с достаточно высокой точностью рассчитать её плотность ($\gamma_{\text{ПСМ}}$):

$$\gamma_{\text{ПСМ}} = \gamma_{\text{ст}} [1 - (1 - 2t/D)^3], \text{ где } \gamma_{\text{ст}} - \text{плотность стекла.} \quad (2)$$

При определенных допущениях знание относительной толщины стенки полых стеклянных микросфер позволяет ориентировочно оценить и их прочность, поскольку безразмерное отношение t/D используется во всех формулах расчета прочности и устойчивости тонкостенных оболочек, нагруженных равномерно распределенным внешним давлением. В качестве примера рассмотрим поведение идеальной (правильная сферическая форма и постоянная толщина стенки) полый стеклянной микросферы, нагруженной внешним давлением. Диаметр микросферы (D) – 80 мкм, толщина стенки (t) – 1 мкм, модуль упругости стекла (E) – 70 ГПа, коэффициент Пуассона (μ) – 0,25, а его прочность при сжатии ($\sigma_{\text{сж}}$) – 3,0 ГПа.

Разрушение такой микросферы (тонкостенной стеклянной оболочки) может произойти как в результате потери устойчивости, так и по причине достижения в материале стенки предельных напряжений сжатия.

При оценке устойчивости тонкостенных оболочек под действием равномерно распределенного внешнего давления в настоящее время используют два подхода. Первый базируется на исследовании неустойчивости Эйлера тонкостенных оболочек на основе линейной теории, в основе другого лежит гораздо более сложная нелинейная теория устойчивости упругого равновесия тонкостенной сферической оболочки.

Базируясь на рекомендациях, сформулированных на основе линейной теории [13, 14], расчетное критическое давление (P_E), при котором произойдет разрушение выбранной в качестве примера идеальной по геометрии тонкостенной сферической оболочки из изотропного материала можно рассчитать по формуле:

$$P_E = \frac{4,6 E \left(\frac{t}{D}\right)^2}{\sqrt{(1 - \mu^2)}} = 53 \text{ МПа}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости стекла; μ – коэффициент Пуассона стекла; t – толщина стенки микросферы; D – внешний диаметр микросферы.

Расчеты, основанные на нелинейной теории устойчивости упругого равновесия тонкостенной сферической оболочки, показывают существенно меньшее значение давлений, приводящих к разрушению тонкостенных сферических оболочек. Для таких расчетов можно использовать очень простую «формулу Мушгари», которая, по мнению многих специалистов, позволяет достаточно точно оценить значение критических давлений, вызывающих потерю устойчивости сферических оболочек из изотропных материалов [15–16]. Для нашего случая давление разрушения составит:

$$P_E = 1,36 E \left(\frac{t}{D}\right)^2 = 14,9 \text{ МПа} \quad (4)$$

Рис. 7. Зависимости расчетных значений разрушающего давления от относительной толщины стенки (t/D) идеальных по геометрии полых стеклянных микросфер: 1 – разрушение в результате достижения в стекле предельных сжимающих напряжений; 2 – разрушение в результате потери устойчивости (линейная теория); 3 – разрушение в результате потери устойчивости (нелинейная теория); * – относительная толщина стенки, при которой происходит изменение механизма разрушения микросфер.

Сравнивая результаты расчетов, проведенных по формулам (3) и (4), можно констатировать, что величина предельного давления потери устойчивости, рассчитанная по линейной теории, более чем в три раза выше давления, определенного по теории нелинейной.

Как отмечалось выше, разрушение полых стеклянных микросфер может произойти также и по другой причине – в результа-

те достижения предельных для материала стенки (в нашем случае стекла) напряжений сжатия $[\sigma_{сж}]$. При разрушении микросфер по этому механизму, критическое давление (P_{σ}) определяется следующей зависимостью [17, 18]:

$$P_{\sigma} = 4[\sigma](t/D) = 150 \text{ МПа} \quad (5)$$

На рис. 7а результаты проведенных расчетов представлены в виде графических зависимостей предельного давления от относительной толщины стенки идеальных по геометрии полых стеклянных микросфер, разрушающихся по различным механизмам. На рис. 7б в более крупном масштабе выделен участок графика этих зависимостей, охватывающий область изменения относительной толщины стенки для реальных промышленных ПСМ (от 0,01 до 0,05).

Таким образом, из представленных на рис. 7а данных видно, что «идеальные» полые стеклянные микросферы с относительной толщиной стенки менее 0,12 мкм (при диаметре 60 мкм это соответствует толщине стенки около 7 мкм) должны разрушаться по механизму потери устойчивости. Поскольку относительная толщина стенки основной массы промышленных ПСМ существенно меньше 0,12 и обычно не превышает 0,05, превалирующим механизмом их разрушения должна быть потеря устойчивости. Естественно, что этот вывод можно распространить только на микросферы правильной сферической формы и с постоянной толщиной стенки.

Констатируя наличие существенной разнотолщинности у большинства промышленных ПСМ, можно предположить, что этот фактор должен привести к радикальному снижению реальной величины критического давления, по сравнению с теми значениями, которые были рассчитаны по уравнениям (3) и (4). Очевидно также, что определяемые по формуле (5) значения разрушающих давлений также представляются сильно завышенными. При нагружении микросфер внешним давлением разнотолщинность стенки приводит к неравномерной их деформации, в результате чего появляются зоны с высокой концентрацией напряжений. Кроме этого, определённая часть промышленных микросфер может иметь различные микродефекты. Это могут быть не только царапины и локальные дефекты, возникающие на поверхности микросфер при их формообразовании и дальнейшей переработке, но также возможные включения инородных микрочастиц и газовых микропузырьков. В результате число зон с высокой концентрацией напряжений ещё больше увеличивается, что резко снижает величину давления, при котором происходит разрушение ПСМ. В данном случае можно провести аналогию с прочностью тонких стеклянных волокон. Многочисленными исследованиями было показано, что реальная прочность промышленных стеклянных волокон более чем в 3 раза меньше теоретически рассчитанной [19]. Учитывая гораздо более сложный механизм разрушения полых стеклянных микросфер, а также огромную вариативность их геометрических размеров (диаметр, толщина стенки и степень её вариативности), расхождение между «теорией» и «практикой» при определении механических свойств полых стеклянных микросфер может быть ещё более значимым. Так, например, экспериментально определенная прочность микросфер размерной группы 60–80 мкм, выделенной из исходных ПСМ марки МС-ВП А9 2гр., составляет около 3 МПа [2]. В то же время прочность микросфер диаметром 80 мкм, рассчитанная по формуле (3), должна составлять 14,9 МПа.

Оценивая прочность полых микросфер, необходимо иметь в виду ещё один фактор, который может существенным образом влиять на величину определяемых прочностных характеристик ПСМ, а также композитов на их основе. Разрушение микросфер при их нагружении внешним равномерно распределенным давлением может происходить не только при достижении предельных напряжений сжатия в материале стенки или в результате потери устойчивости, но также и по другому, третьему механизму. Определенное количество тонкостенных хрупких стеклянных микросфер неизбежно будет разрушаться в результате их прямого, точечного контакта друг с другом.

Заключение

У основной массы промышленных полых стеклянных микросфер толщина стенки в разных её местах может существенно разниться. Разнотолщинность стенки ПСМ характерна для продукции от всех основных мировых производителей.

С увеличением диаметра полых стеклянных микросфер относительная толщина стенки уменьшается, а степень их разнотолщинности увеличивается. Этот фактор существенным образом влияет на прочность микросфер. Фактическая прочность реальных полых стеклянных микросфер всегда будет существенно ниже прочности, рассчитанной для «идеальных» стеклянных сферических оболочек с соответствующей относительной толщиной стенки.

При одном и том же уровне внешнего гидростатического давления разрушение полых стеклянных микросфер может происходить одновременно по трем разным механизмам: потеря устойчивости, достижение предельных напряжений сжатия в материале стенки, а также в результате прямого контакта микросфер друг с другом. Определить превалирующий механизм разрушения реальных полых стеклянных микросфер при их нагружении в настоящее время не представляется возможным. Поэтому на сегодняшний день экспериментальные лабораторные исследования являются единственным достоверным методом определения прочности промышленных ПСМ.

Литература

1. Трофимов А.Н., Плешков Л.В., Байков А.В., Стогова И.В. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Пластические массы, 2020, №11–12, с. 15–21.
2. Плешков Л.В., Трофимов А.Н., Байков А.В., Смирнов А.А. Морфология и свойства полых стеклянных микросфер. Пластические массы, 2021, №1–2, с. 33–37.
3. M. Porfiri, N. Gupta. Effect of volume fraction and wall thickness on the elastic properties of hollow particle filled composites. – Composites. Part 2. September. 2008, p.169.
4. Zhuo Chen, Shixiong Huang, Bingyan Jiang. Syntactic for prepared with glass hollow spheres of designed size and wall thickness ratio. Advanced Materials Research Vols. 1061–1062. 2015 pp 129–132.
5. N. Gupta, T. Woldesenbet. Microballoon wall thickness effects on properties of syntactic forms. Cellulose Plastics, 6, 2004, pp. 461–480.
6. Ruoxuan Huang, Peifeng Li. Elastic behavior and failure mechanism in epoxy syntactic forms: The effect of glass microballoon volume fractions. Composites Part B 78, 2015, p. 403.
7. Ji-Z. Liang. Estimation of thermal conductivity for polypropylene hollow glass bead composites. Compos.: Part B 56, 2014. P. 431–434.
8. E. Stephen, B. Yalcin. Hollow glass microspheres for plastics, elastomers, and adhesives compounds. 2015. P. 478.
9. Будов В.В., Стеценко В.Я. Выбор состава стекла для получения полых микросфер. Стекло и керамика. №8, 1988, Стройиздат, с. 15–16.
10. Асланова М.С., Стеценко В.Я., Шустров А.Ф. Полые неорганические сферы. Химическая промышленность за рубежом, №9, 1981, НИИТЭХИМ с. 33–50.
11. Байков А.В., Корохин Р.А., Солодилов В.И., Горенберг А.Я., Иванова-Мумжиева В.Г., Зверева У.Г., Куперман А.М. Влияние фракционирования стеклянных микросфер на упруго-прочностные свойства синтактиков. Композиты и наноструктуры. Т. 9, №1, 2017.
12. H.S. Kim, P. Plubrai. Manufacturing and failure mechanisms of syntactic form under compression. Composites: Part A 35, 2004, p 1010.
13. Zoelly R. Über ein Knickungsproblem an der Kugelschale. Promotionsarbeit, Zurich. 1915.
14. Лейбензон Л.С. О приложении метода гармонических функций Томсона к вопросу устойчивости сжатых сферической и цилиндрической оболочек. Юрьев: Ученые записки Юрьевского ун-та. 1917. №5. С. 1–47.
15. Муштары Х.М. К теории устойчивости сферической оболочки под действием внешнего давления // ПММ. 1955. Т. 19, Вып. 2. С. 251–254.
16. Новожилов В.В. Краткий очерк развития теории оболочек в СССР // Исследования по теории пластин и оболочек. Вып. VI–VII. Казань: Изд-во КГУ. 1970. С. 3–22.
17. Феодосьев В. И. Об устойчивости сферической оболочки под действием внешнего равномерно распределенного давления // ПММ. 1954. Т. 18, Вып.1. С. 90–95.
18. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов: 5-е изд., перераб. и доп. / Г.С. Писаренко, Ф.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Издательство «Дельта», 2008. – 816 с.
19. Стеклянные волокна под ред. М.С. Аслановой. М.: Химия 1979. с 155–159.