

УДК 539.3

О РАЗРУШЕНИИ СФЕРОПЛАСТИКА СЖАТИЕМ С КРУЧЕНИЕМ*

Карпов Е.В.

*ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
г. Новосибирск, Россия***АННОТАЦИЯ**

Синтактные пены, сочетающие низкую плотность с высокой прочностью и рядом других полезных свойств, широко применяются в аэрокосмической и судостроительной отраслях. Из-за сложности структуры механизм их разрушения зависит от вида термосилового нагружения. В данной работе представлено экспериментальное исследование деформирования и разрушения сферопластика при различных режимах сложного нагружения. Сферопластик представлял собой эпоксидно-диановую синтактную пену со стеклянными микросферами в качестве наполнителя. Толщина стенок стеклянных микросфер составляла 1 мкм, средний диаметр – около 20 мкм, объемное содержание в композите – 60%. Нагружение проводилось при различных сочетаниях совместного и последовательного сжатия и кручения. Также рассмотрено разрушение материала при фиксированном положении захватов нагружающей системы в результате последствия. Испытания проводились при различных температурах. Температура влияет на тип разрушения матрицы, степень подвижности частиц наполнителя при деформировании композита и состояние межфазных границ. Проведен анализ траекторий нагружения, кривых релаксации и поверхностей разрушения при различных режимах нагружения и температурах. На основе проведенного анализа сделан вывод, что сферопластик при сложном нагружении демонстрирует поведение, свойственное сыпучим материалам, в которых перемещение частиц затруднено адгезией со связующим материалом. Характерные черты сыпучих материалов проявляются по мере увеличения податливости матрицы и накопления микроструктурных дефектов, ослабляющих связь между частицами наполнителя.

Ключевые слова: сферопластик; синтактная пена; композит; сложное нагружение; необратимое деформирование; разрушение; релаксация; сыпучий материал

**ABOUT THE DESTRUCTION OF SPHEROPLASTICS
BY COMPRESSION AND TORSION**

Karpov E. V.

*Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences, Novosibirsk, Russia***ABSTRACT**

Synthetic foams combining low density with high strength and a number of other useful properties are widely used in aerospace and shipbuilding industries. The mechanism of their destruction depends on the type of thermal-force loading due to the complex microstructure.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований СО РАН (2017-2020) (проект III.23.3.1).

In this paper we present an experimental study of the deformation and fracture of spheroplastics under various conditions of complex loading. The spheroplastic was an epoxy-diane syntactic foam with glass microballoons as a filler. The thickness of the glass microballoon walls was 1 μm , the average diameter was about 20 μm , the volume content in the composite was 60%. Loading was a different combination of joint and consistent compression and torsion. We also investigated the material destruction at a fixed position of the loading system clamps as a result of the aftereffect. The tests were carried out at various temperatures. Temperature affects the type of destruction of the matrix, the degree of filler particles mobility during the deformation of the composite and the state of the interphase boundaries. Analysis of loading trajectories, relaxation curves and fracture surfaces under various loading regimes and temperatures is carried out. On the basis of the analysis it was concluded that the spheroplastic under complex loading demonstrates the behavior peculiar to granular materials in which the movement of particles is impeded by adhesion with a binder. Characteristic features of granular materials are manifested with increasing compliance of the matrix and the accumulation of microstructural defects that weaken the bond between the filler particles.

Keywords: spheroplastic; syntactic foam; composite; complex loading; irreversible deformation; destruction; relaxation; granular material

ВВЕДЕНИЕ

Сферопластики, известные также как синтактные пены, представляют собой полимерные пеноматериалы с закрытой пористостью, которая обеспечивается добавлением в полимерную основу пустотелых тонкостенных сферических включений [1]. Эти включения имеют обычно диаметры до нескольких десятков микрон, изготавливаются из стекла или керамики и заполняют значительную часть объема материала. Их наличие обеспечивает сферопластикам уникальный комплекс свойств, включающий низкую плотность, почти нулевую гигроскопичность, низкое тепловое расширение, тепло- и звукоизоляционные свойства и прочность, значительно превышающую прочность обычных полимерных пен. Благодаря этим свойствам, сферопластики находят широкое применение в аэрокосмической и морской технике, в частности, в сэндвич-панелях и для заполнения пустотелых элементов конструкций [2-6].

Наибольшее внимание уделяется синтактным пенам на основе эпоксидных смол с наполнителем в виде стеклянных микросфер, но существуют исследования и других разновидностей сферопластиков. Так в [7] исследованы статические, динамические и температурные свойства сферопластика, наполнителем которого являются полимерные пустотелые частицы, в [8] в качестве наполнителя используются керамические сферы, а в [9,10] – ценосферы. В [11,12] исследованы синтактные пены на основе винилового эфира и полиэфирного связующего.

Большое количество работ посвящено определению эффективных упругих и прочностных характеристик синтактных пен при одноосном нагружении. Большинство современных исследований, посвященных этой тематике, опираются на конечно-элементное структурное моделирование на примере представительного объема, результаты которого могут усредняться тем или иным способом [8,9,13-16]. Помимо получения эффективных характеристик, рассматривается также моделирование разрушения на структурном уровне, где в качестве главного фактора разрушения материала рассматривается разрушение пустотелых включений как при сжатии, так и при растяжении композита. Такой механизм разрушения как расслоение на межфазных границах [17,18] почти никем при моделировании разрушения не учитывается.

Многими авторами проводились экспериментальные исследования прочностных характеристик и разрушения сферопластиков при одноосном нагружении [7-12,16]. В [19] рассматривается зависимость прочностных характеристик от объемного содержания и плотности стеклянных микросфер в стекло-эпоксидном сферопластике при постоянной температуре и скорости нагружения. В [20] – влияние скорости (от 10^{-3} до $4 \cdot 10^3$ с⁻¹) на разрушение структуры сферопластика и макроскопическое разрушение. В [21] – влияние на разрушение сферопластика температуры и скорости нагружения. В [5] дан анализ основных видов разрушения сотовых конструкций, заполненных сферопластиком в зависимости от свойств сферопластика.

Сферопластик обычно используют в качестве заполняющего материала, который в исходном жидком виде заливается в пустоты конструкции, где затем происходит его отверждение. В связи с этим часто возникает ситуация, когда в сферопластик оказываются залиты металлические элементы [6]. Взаимодействие сферопластика с этими элементами порождает сложные напряженные состояния со значительными нагрузками. При сложном нагружении даже однородные материалы могут приобретать анизотропию свойств, а один компонент нагрузки может влиять на критические значения других компонентов. Для материалов со столь сложной структурой, как синтактные пены, исследование поведения при сложном нагружении тем более актуально, что при разных условиях нагружения в сферопластике реализуются совершенно разные механизмы разрушения, связанные с его матрицей, наполнителем и межфазными границами [21].

Данная работа представляет собой экспериментальное исследование деформирования и разрушения сферопластика при сложном нагружении (различные режимы сжатия с кручением) при различных температурах.

1. ОБРАЗЦЫ И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Используемый в работе сферопластик ЭДС-7А рассматривается как типичный представитель стекло-эпоксидных синтактных пен, 60% объема которого составляют полые стеклянные микросферы со средним диаметром 20 мкм и толщиной стенок около 1 мкм. Плотность материала составляет 700 кг/м³.

При комнатной температуре ($\approx 20^\circ\text{C}$) и ниже ЭДС-7, как и большинство стекло-эпоксидных синтактных пен, остается упругим до разрушения при растяжении, сжатии и кручении. Только при сжатии наблюдается небольшая псевдо-пластическая деформация около 1% [21] (на диаграмме деформирования вместо резкого спада нагрузки присутствует непродолжительный участок замедления роста нагрузки, переходящий через максимум к зачаточной ниспадающей ветви). Эта псевдо-пластичность в действительности представляет собой скольжение объемов, разделенных закрытыми трещинами, фронты распространения которых полностью или частично еще не вышли на свободные границы, из-за чего образец частично сохраняет несущую способность до окончательного разрушения. То есть образец в таком состоянии представляет собой реологическую модель упруго-пластического тела, состоящего из упругого элемента и нескольких элементов трения.

При нагреве матрица и весь композит в целом приобретают способность к необратимому деформированию без разрушения, увеличение температуры

уменьшает предел упругости, увеличивает предельно допустимую необратимую деформацию и влияет на адгезию матрицы к микросферам [21]. Увеличение деформируемости матрицы облегчает взаимное перемещение частиц наполнителя при нагрузке. Ослабление адгезии может приводить к появлению трещин, которые зарождаются как расслоения на межфазных границах, переходят в матрицу [17] и соединяются в итоге в макротрещины. Разрушение, полностью определяемое этим механизмом, существенно снижающее деформируемость композита, происходит при температурах выше 70°C [21]. До достижения этой температуры поведение ЭДС-7 при разных температурах может служить моделью поведения синтактных пен с различными характеристиками неупругости матрицы.

Эксперименты проводились на цилиндрических образцах с квадратными головками (диаметр рабочей части равен 6,5 мм, длина – 8 мм, сторона квадратной головки – 10 мм) на модификации универсальной электромеханической испытательной машины Zwick\Roell Z100, позволяющей осуществлять одновременное нагружение осевым сжатием и крутящим моментом.

Образцы во время нагружения находились в закрытой навесной цилиндрической печи, температура образца контролировалась присоединенной термопарой. Испытания проводились при температурах 22, 40, 45, 54 и 58°C в режимах совместного сжатия-кручения с различными отношениями нагрузок, последовательного сжатия-кручения с различными значениями максимальной сжимающей нагрузки, последовательного кручения-сжатия и ступенчатого одноосного нагружения (сжатия либо кручения) с выдержками по времени для изучения релаксации нагрузок в различных условиях. Нагружение производилось перемещением подвижной траверсы с постоянной скоростью и поворотом шкива крутящего привода с постоянной скоростью.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Совместное сжатие с кручением.

При одновременном нагружении сжатием и кручением перед началом испытания осуществлялась преднагрузка крутящим моментом, затем сжатием с целью выборки начальных люфтов, чтобы все кривые одной серии имели одну начальную точку. Без преднагрузки было бы невозможно обеспечить одновременное завершение выборки люфтов для обеих осей нагружения.

Результаты испытаний представлены на рис.1. Здесь на плоскости Σ – M приведены траектории нагружения одновременным сжатием и кручением для разных температур. $\Sigma = \sigma / \sigma_{\text{lim}}^{22^\circ}$ – безразмерная осевая нагрузка, где σ – сжимающее напряжение вдоль оси образца, $\sigma_{\text{lim}}^{22^\circ}$ – предельное значение сжимающего напряжения вдоль оси образца при 22°C. $M = m / m_{\text{lim}}^{22^\circ}$ – безразмерный крутящий момент, где m – крутящий момент, $m_{\text{lim}}^{22^\circ}$ – предельное значение крутящего момента при 22°C. Базовый режим (кривые 2) выбран так, чтобы обе нагрузки при 22°C приближались к своим критическим значениям с одинаковой скоростью. В остальных режимах скорость кручения сохранялась, а скорость сжатия изменялась: для кривых 1 скорость сжатия в два раза ниже базовой, для кривых 3 и 4 – в полтора и два раза выше базовой соответственно.

Это позволяет получить различные соотношения крутящего момента и сжимающей нагрузки при совместном нагружении.

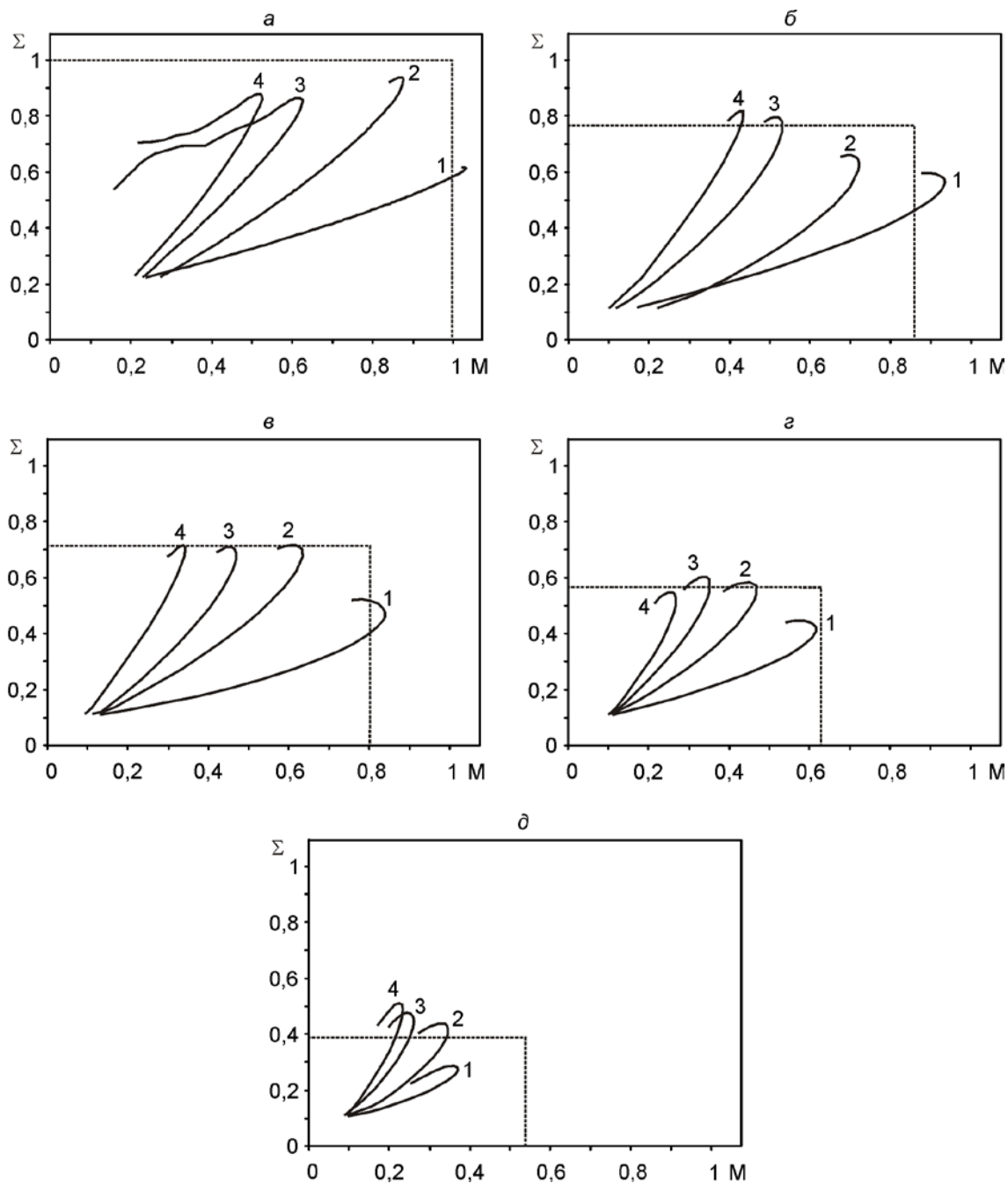


Рис.1. Траектории нагружения сферопластика одновременным сжатием и кручением для различных режимов нагружения и температур: а – 22°C, б – 40°C, в – 45°C, г – 54°C, д – 58°C. Пунктирные прямые соответствуют предельным значениям Σ и M при одноосном нагружении.

2.2. Последовательное сжатие с кручением.

При последовательном нагружении сжатием и крутящим моментом осуществлялась преднагрузка крутящим моментом, поскольку равномерная выборка начальных люфтов для кручения после нагружения сжатием была бы невозможна из-за силы трения.

На рис.2а, 2б, 2в на плоскости Σ – M приведены траектории нагружения последовательным сжатием и кручением для разных температур. На рис.2г для сравнения приведены участки этих траекторий, соответствующие кручению при постоянной длине образца после сжатия, где $\Sigma^* = \Sigma/\Sigma_{\max}$, Σ_{\max} – безразмерная сжимающая нагрузка, после достижения которой производилось кручение. На рис.2г кривая 1.а соответствует кривой 1 рис.2а, 2.а – кривой 2 рис.2а, 1.б – кривой 1 рис.2б и т.д.

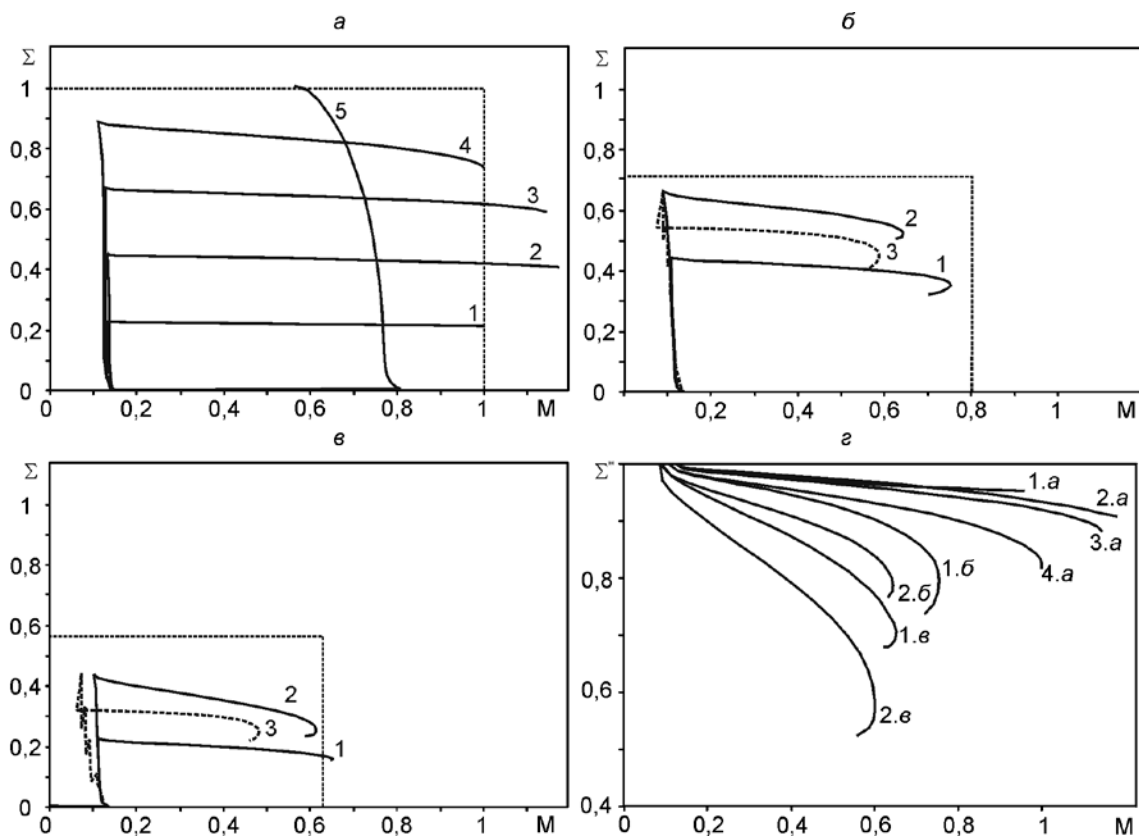


Рис.2. Траектории нагружения сферопластика последовательным сжатием и кручением для различных температур: а – 22°C , б – 45°C , в – 54°C , г – сравнение кручения после сжатия для трех температур. Пунктирные прямые соответствуют предельным значениям Σ и M при одноосном нагружении.

2.3. Релаксация осевой и крутильной нагрузки.

На рис.3а в безразмерном виде приведены графики зависимости приложенной нагрузки от времени. $\Sigma' = \sigma/\sigma_{\text{lim}}$ где σ – сжимающее напряжение вдоль оси образца, σ_{lim} – предельное значение сжимающего напряжения вдоль оси образца при той же температуре. $M' = m/m_{\text{lim}}$ – безразмерный крутящий момент, где m – крутящий момент, m_{lim} – предельное значение крутящего момента при той же температуре. $T = t/1000$ с – безразмерное время. Активное нагружение чередуется с выдержками по времени, при которых деформация образца остается постоянной. Кривые 1–3 соответствуют $\Sigma'(T)$ для температур

22, 45, 54°C соответственно, кривая 4 – $M'(T)$ для температуры 22°C. Образцы, которым соответствуют кривые 2 и 3 на рис.3а, после последней догрузки подвергались кручению до разрушения, что отражено на кривых 2 рис.3б и рис.3в соответственно.

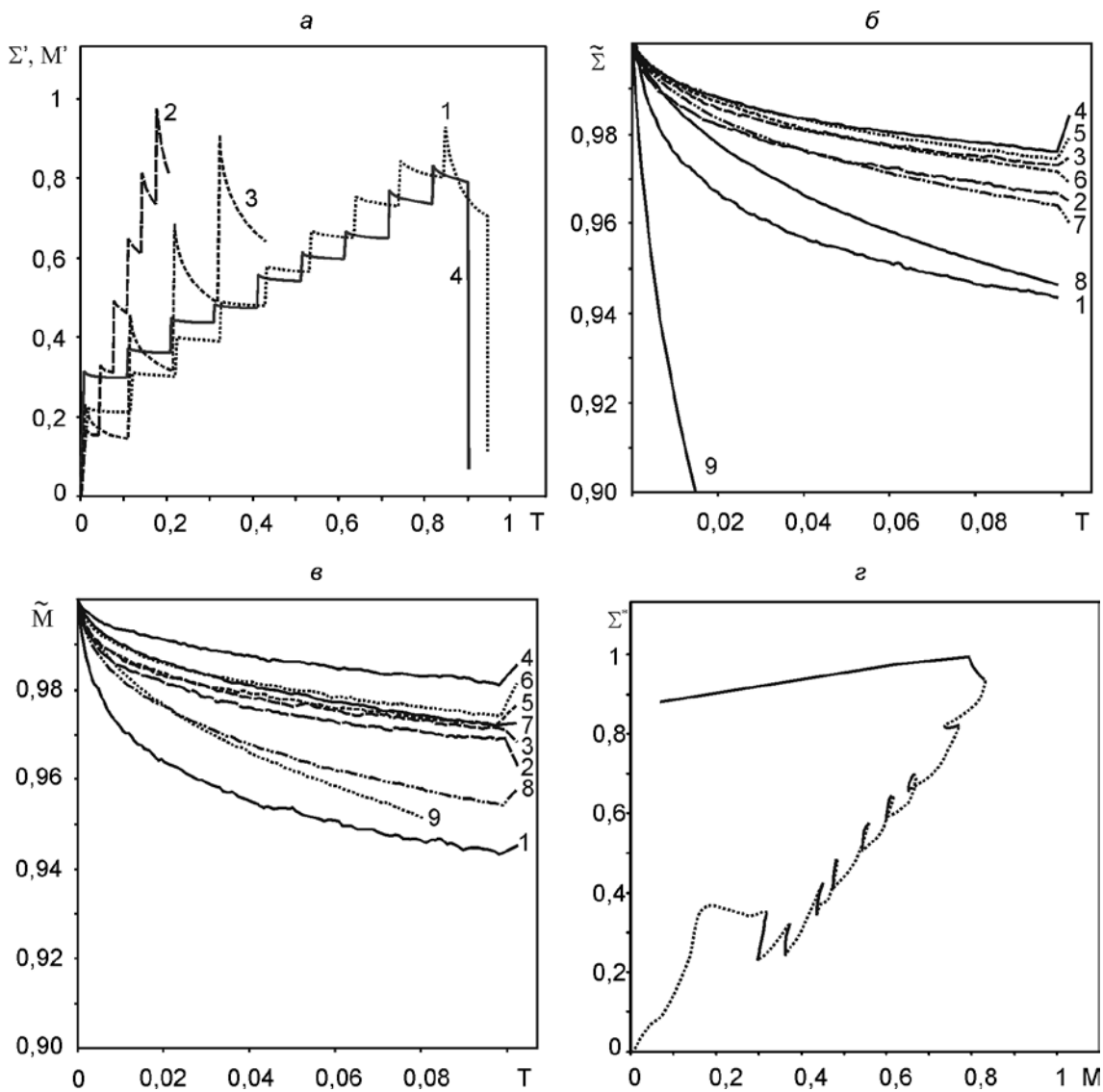


Рис.3. Релаксация нагрузки при выдержке при постоянной деформации: а – кривые ступенчатого нагружения с релаксацией нагрузки, б – кривые релаксации осевого сжимающего напряжения на последовательных ступенях нагружения, в – кривые релаксации крутящего момента на последовательных ступенях нагружения, г – траектория нагружения при ступенчатом кручении с постоянно длиной образца с выдержками при постоянном угле закрутки.

На рис.3б, 3в приведены кривые релаксации осевого сжимающего напряжения и крутящего момента на последовательных ступенях нагружения. Здесь $\tilde{\Sigma}(T') = \Sigma'(T')/\Sigma'(0)$, $\tilde{M}(T') = M'(T')/M'(0)$, T' – промежуток безразмерного времени T , начинающийся в момент остановки подвижного

захвата на очередной ступени нагружения. Номера кривых соответствуют номерам ступеней нагружения.

Образцы, доведенные в этих испытаниях до разрушения, разрушались во время выдержки при постоянном положении захватов нагружающей системы. То есть разрушение происходило не при активном влиянии внешних воздействий, а в результате последействия. Разрушение во время релаксации нагрузок происходило как при сжатии, так и при кручении.

При стесненном кручении возникает распирающая осевая сила, создающая сжимающие напряжения вдоль оси образца, так что по изменению этих напряжений во время выдержки можно делать некоторые выводы об изменениях внутри образца, нагружаемого крутящим моментом. Для этого результаты эксперимента, которому соответствует кривая 4 на рис.3а, были рассмотрены в виде траектории нагружения в плоскости безразмерных нагрузок Σ^* , М (рис.3г), где Σ^* – отношение осевого сжимающего напряжения к его максимальному значению в эксперименте, а М – отношение крутящего момента к его предельному значению для данной температуры.

Нагружение осуществлялось кручением верхнего торца цилиндра, осевая нагрузка возникала, как реакция на скручивание образца, имеющего постоянную длину. Пунктирные участки кривой соответствуют активному нагружению, сплошные – выдержке по времени при постоянных значениях длины цилиндра и угла его закрутки. Сложная зависимость Σ^* от М на этапе начального нагружения связана с начальной подстройкой образца к системе нагружения.

2.4. Типы разрушения при нагружении сжатием с кручением.

При разрушении одноосным сжатием или растяжением для сферопластика характерно два типа разрушения. В результате действия растягивающих нагрузок при одноосном растяжении или при раскалывании образуются относительно ровные поверхности с зернистой структурой, содержащие в основном неповрежденные микросферы. При одноосном сжатии образуются поверхности с разрушенной структурой, ориентированные приблизительно вдоль площадок максимальных касательных напряжений. Их образованию предшествует зарождение и развитие сдвиговых трещин, число которых может быть велико, в отличие от растяжения, когда трещина одна. Из-за скольжения берегов этих трещин друг относительно друга на берегах происходит разрушение большинства микросфер, даже если сферы не были разрушены в процессе образования трещин.

При сложном нагружении тип разрушения зависит от соотношения приложенных нагрузок и степени неупругости матрицы. В экспериментах наблюдалось пять основных типов разрушения, примеры которых представлены на рис.4.

Первый тип (рис.4а): образование винтовой трещины с поверхностью, характерной для трещин отрыва. Наклон трещины к вертикали составляет около 45° . Это результат разрушения кручением.

Второй тип (рис.4б): образование в средней части образца винтовой трещины с наклоном $20\div 30^\circ$ к вертикали, вблизи краев винтовая трещина переходит в две трещины сдвига с углом наклона к вертикали $60\div 70^\circ$. Это результат последовательного разрушения сначала под действием кручения, затем – сжатия.

Третий тип (рис.4в): образование сложной комбинации участков отрыва и скольжения с трением. Это результат одновременного разрушения как кручением, так и сжатием, причем участки разрушения кручением и сжатием не совпадают и хаотически распределены по образцу. Этот тип разрушения встречается относительно редко и, по всей видимости, представляет собой частный случай второго типа, когда вместо одной винтовой трещины, проходящей через весь образец, образуется несколько независимых винтовых трещин, которые затем соединяются трещинами.

Четвертый тип (рис.4г): образование винтовой трещины с поверхностью, характерной для трещин сдвига. Наклон поверхности разрушения к вертикали $60\div 70^\circ$. Это результат одновременного разрушения кручением и сжатием по одной и той же поверхности.

Пятый тип (рис.4д): образование плоской поверхности разрушения с рельефом, характерной для разрушения одноосным сжатием. Наклон поверхности разрушения к вертикали в большинстве случаев составляет около 45° . Однако при некоторых режимах нагружения может достигать $50\div 60^\circ$.

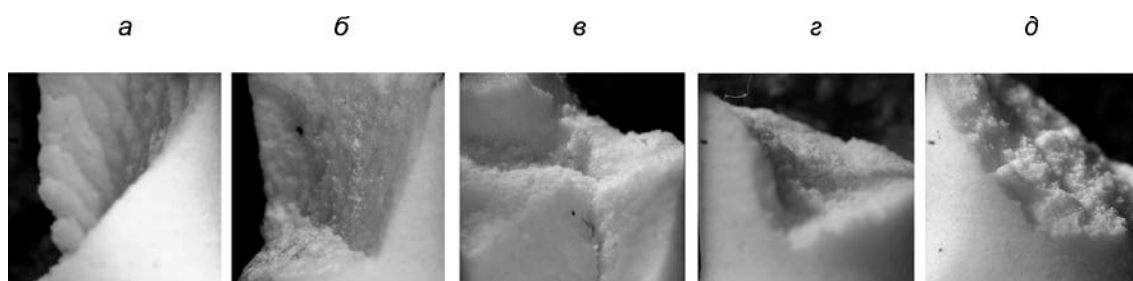


Рис.4. Пять типов разрушения цилиндрических образцов сферопластика при различных режимах нагружения сжатием и кручением.

Трещины сдвига, как плоские, так и винтовые имеют рыхлую рельефную поверхность, состоящую как из разрушенных, так и из целых микросфер. Таким образом, они представляют собой не столько трещины, сколько области разрушения с толщиной, превышающей характерный размер структуры, формирующиеся объединением множества микроструктурных дефектов.

Таблица 1.

Виды разрушения при разных условиях нагружения.

№ рис.	№ кривой	Тип разрушения	Наклон поверхности отрыва, °	Наклон поверхности скольжения с трением, °
1а	1	2	33	69
1а	2	2	20	63
1а	3	2	18	60
1а	4	5	–	60
1б	1	2	24	71
1б	2	3	≈30	≈60
1б	3	4	61	61
1б	4	5	–	57
1в	1	2	30	75
1в	2	4	59	59
1в	3	4	62	62

1в	4	4	62	62
1г	1	4	62	62
1г	2	4	62	62
1г	3	4	58	58
1г	4	4	54	54
1д	1	4	62	62
1д	2	5	–	59
1д	3	5	–	54
1д	4	5	–	47
2а	1	1	45	–
2а	2	1	45	–
2а	3	2	28	65
2а	4	2	22	74
2а	5	4	60	60
2б	1	4	70	70
2б	2	4	60	60
2б	3	4	60	60
2в	1	2	43	70
2в	2	4	63	63
2в	3	4	72	72
3а	1	5	–	45
3а	4	1	45	–

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведем сопоставление траекторий нагружения сферопластика при различных режимах нагружения с типом итогового разрушения, зависящего как от соотношения нагрузок по двум осям, так и от температуры, влияющей на податливость матрицы, ее предельное деформирование и адгезию с частицами наполнителя.

Рассмотрим сначала одновременное активное нагружение по обеим осям. Разрушение во всех случаях начинается с потери сопротивления кручению, за которым следует потеря сопротивления сжатию.

При температуре 22°C сжатие с преобладанием кручения (режим 1) увеличивает предельное значение крутящего момента. Этот эффект сохраняется и при повышении температуры (40 и 45°C), причем во всех трех случаях наблюдается второй тип разрушения, при котором сперва образуется винтовая трещина отрыва, а разрушение под действием сжатия играет второстепенную роль. При температуре 22°C угол между нормалью к поверхности отрыва и вертикальной осью уменьшается при увеличении сжимающей нагрузки (режимы 2 и 3). При температуре 54°C эффект упрочнения пропадает, а при 58°C сменяется на противоположный. Вместе с этим в обоих случаях тип разрушения меняется на четвертый.

Увеличение сопротивления кручению при сжатии может быть вызвано затруднением скольжения горизонтальных слоев при сдвиге. Исчезновение эффекта и дальнейшее значительное уменьшение сопротивления кручению может быть связано с увеличением податливости матрицы при нагреве. Подвижность микросфер увеличивается и возможны ситуации типа рис.5а, когда вертикально смещающаяся сферическая частица раздвигает соседние частицы горизонтально

достаточно сильно, чтобы образовались вертикальные отслоения сфер от матрицы, ослабляющие сопротивление сдвигу. Ориентация таких дефектов меняется по мере закручивания образца и в результате их объединения формируется область разрушения четвертого типа.

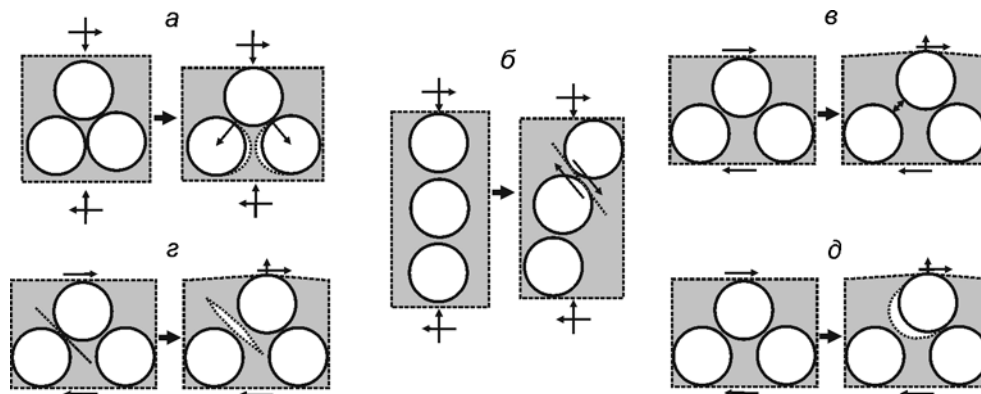


Рис.5 Схемы возможных видов взаимного перемещения частиц наполнителя при сложном нагружении сферопластика.

В режимах, где сжатие преобладает над кручением (3, 4) при температуре 22°C кручение снижает предел прочности на сжатие. Это может быть вызвано тем, что кручение приводит к потере устойчивости вертикальных рядов частиц наполнителя (рис.5а). Возникающие при этом смещения частиц могут вызывать образование трещин сдвига в хрупкой матрице, не выдерживающей больших деформаций. При нагреве предельные деформации матрицы возрастают и эффект пропадает, сменяясь на противоположный.

Большая часть объема сферопластика приходится на пустотелые сферические включения, имеющие достаточно плотную упаковку, что позволяет рассматривать его как подобие гранулированного материала, движение частиц которого затруднено связующим. Увеличение предельной прочности на сжатие при добавлении сдвига может возникать вследствие дилатансии, свойственной сыпучим материалам. Дилатансия представляет собой изменение объема сыпучей среды при сдвиге, вызываемое ее переупаковкой [22]. Если сыпучая среда находится в стесненных условиях, при которых общее увеличение объема невозможно, происходит увеличение локальных объемов, что приводит к росту давления [23].

При повышении температуры образование винтовой трещины отрыва, распространяющейся в хрупкой матрице, полностью теряет свою роль в разрушении сферопластика, второй и третий типы разрушения сменяются на четвертый и пятый (таб. 1). То есть прочность композита определяется не прочностью матрицы на разрыв, а ее прочностью на сдвиг и адгезией между матрицей и сферическими включениями.

Ранее в [21] отмечалось, что при повышенной податливости матрицы, вызванной нагревом, в сферопластике при одноосном сжатии образуются деформационные структуры, подобные наблюдаемым в сыпучей среде [22]: происходит деление материала на блоки, разделенные полосами сдвига, образующими ортогональную сетку, ориентированную по направлениям максимальных касательных напряжений.

Далее рассмотрим последовательное нагружение.

Когда происходит нагружение кручением после сжатия, длина образца остается постоянной и происходит релаксация сжимающей нагрузки. При этом крутящий момент, увеличивающийся в результате вращения подвижного захвата с постоянной угловой скоростью, можно рассматривать в качестве параметра времени. То есть при отсутствии взаимовлияния нагрузок кривая $\Sigma(M)$ на этапе кручения должна описываться функцией, подобной функции релаксации, которая с течением времени убывает замедленно.

На рис.2 (особенно на рис.2г, удобном для сравнения кривых, благодаря их приведению к единому масштабу) видно, что такая кривая релаксации наблюдается только при температуре 22°C и небольшой величине начального сжимающего напряжения. Во всех остальных случаях на релаксацию накладывается дополнительный процесс, в результате которого напряжение убывает ускоренно. Кривые 3 на рис.2б, 2в отражают этот процесс без наложения релаксации, поскольку релаксация сжимающего напряжения была произведена до начала кручения. Можно отметить, что при заблаговременной релаксации сжимающих напряжений предельное значение крутящего момента заметно снижается.

Поскольку уменьшение сжимающей нагрузки в результате упомянутого дополнительного процесса ускоряется, естественно предположить, что происходит это в результате развития микрповреждений материала.

Предварительное сжатие, как и совместное, может существенно увеличивать прочность материала на сдвиг. Однако по мере приближения предварительного сжатия к пределу прочности этот эффект пропадает. Исчезновение эффекта упрочнения при больших сжимающих нагрузках может быть вызвано образованием микротрещин сдвига в связующем, ослабляющих горизонтальные связи (рис.5г). Сдвиговые микротрещины одновременно способствуют ускорению релаксации сжимающей нагрузки, которую мы и наблюдаем в этом случае. Основной причиной разрушения остается кручение, вызывающее при низких осевых нагрузках разрушение первого типа, где влияние сжатия практически не сказывается, а при больших осевых нагрузках – разрушение второго типа, где разрушение сжатием реализуется уже после образования винтовой трещины.

Предварительное закручивание до достижения 0,8 предельного крутящего момента практически не влияет на предел прочности при сжатии и реализуется четвертый тип разрушения. Стоит заметить, что при совместном нагружении при близких значениях крутящего момента происходило снижение прочности на сжатие и имел место второй тип разрушения, при котором разрушение кручением играет первостепенную роль.

Как и для предварительного сжатия, на релаксацию крутящего момента накладывается процесс его ускоренного уменьшения, связанный с накоплением микроструктурных повреждений. В данном случае это могут быть микротрещины сдвига, возникающие в хрупкой матрице при сжатии (рис.5г). Эти трещины должны уменьшать прочность на сжатие, но их наличие увеличивает подвижность частиц наполнителя, что способствует проявлению дилатансии в стесненных условиях, которая может компенсировать уменьшение прочности на сжатие.

Повышение температуры сказывается на прочности материала и типе его разрушения при последовательном нагружении сжатием и кручением так же, как и при совместном.

Наконец, рассмотрим релаксацию нагрузок при простом нагружении сжатием и кручением.

Как видно из рис.3б, 3в, релаксация осевой нагрузки и крутящего момента в сферопластике не может быть описана формулой вида $\sigma(t) = \varphi(t)\varepsilon_0$, где ε_0 – деформация, достигнутая во время активного нагружения, а $\varphi(t)$ – функция релаксации. После каждой догрузки функция релаксации имеет новый вид, причем в ее изменении прослеживается следующая закономерность: величина относительного спада нагрузки за фиксированный промежуток времени сперва уменьшается при переходе на следующую ступень нагружения (первые 4 ступени), а затем начинает увеличиваться. Функции релаксации на стадии «замедления» до некоторой степени подобны друг другу с некоторым переменным коэффициентом подобия. На стадии «ускорения» отсутствие подобия становится явным. При сжатии изменения функций релаксации на стадии «ускорения» гораздо существеннее, чем при кручении.

Из этих наблюдений можно сделать вывод, что релаксация нагрузки в сферопластике происходит не только за счет релаксации нагрузок в материалах его компонентов, но и за счет необратимых структурных изменений. Замедление релаксации может быть вызвано смещением частиц наполнителя, приводящим к более плотной их упаковке, а ускорение – накоплением повреждений, ослабляющих связь между частицами наполнителя, обеспечиваемую матрицей.

В пользу последнего предположения говорит также тот факт, что сферопластик демонстрирует способность к разрушению во время выдержки при фиксированном положении захватов. Одну из характерных особенностей этого разрушения можно наблюдать при релаксации крутящего момента (рис.3г).

На рис.3г видно, что при выдержке происходит релаксация как крутящего момента, так и осевой нагрузки, возникающей при кручении образца фиксированной длины. Релаксация крутящего момента, как видно на рис.3а, увеличивается с увеличением начальной нагрузки. При этом спад осевой нагрузки во время выдержки уменьшается на каждой ступени нагружения, хотя сама нагрузка на каждой ступени. На предпоследней ступени спад практически отсутствует, а на последней ступени можно наблюдать релаксацию момента, сопровождаемую увеличением осевой нагрузки и завершающуюся разрушением образца с образованием винтовой трещины, поверхность которой характерна для трещины отрыва (разрушение первого типа).

Такое поведение осевой нагрузки может объясняться образованием отслоений связующего от включений, как показано на схеме рис.5д. Развитие отслоений может играть роль дополнительного механизма релаксации касательных напряжений и одновременно увеличивать подвижность частиц наполнителя, которые могут перемещаться под действием приложенного к образцу крутящего момента, приближая поведение композита к гранулированному материалу. В этом случае увеличение осевой нагрузки является следствием дилатансии в стесненных условиях. На последней ступени этот эффект хорошо проявляется, на предыдущих ступенях его наложение на релаксацию осевой нагрузки может быть причиной замедления этой релаксации.

При повышении температуры, когда матрица от хрупкого типа разрушения переходит к вязкому, а ее податливость, как и предельные деформации всей композиции, существенно возрастают, отмеченные особенности релаксации осевой сжимающей нагрузки не наблюдаются. На всех ступенях нагружения, кроме первой, функции релаксации подобны, а коэффициентом подобия является

начальное значение нагрузки. Это справедливо даже в случаях, когда начальное значение близко к пределу прочности. На основании этого можно сделать вывод, что прогрессирующие изменения механизмов релаксации в композите с хрупкой матрицей вызваны постепенным переходом материала от твердого состояния к подобию сыпучей среды, в которой подвижность частиц увеличивается по мере накопления микротрещин в матрице. Композит с податливой вязкой матрицей изначально близок к сыпучей среде, из-за чего в нем не происходит подобных изменений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При простом нагружении сферопластики обычно моделируют изотропной сплошной средой, имеющей набор эффективных характеристик, получаемых теми или иными методами гомогенизации на основе структурного моделирования. Проведенные эксперименты показали, что при сложном нагружении сферопластик демонстрирует поведение, схожее с поведением гранулированного материала типа песка, в котором перемещение частиц затруднено адгезией со связующим материалом. Подвижность частиц зависит от податливости связующего и наличия структурных микроповреждений, таких как отслоения частиц от связующего и микротрещины в матрице. Кроме того, в отличие от песка и ему подобных сред, микросферы не являются жесткими частицами и в определенных условиях могут быть разрушены, что создает на их месте дефекты упаковки типа вакансий в сыпучей среде. По мере увеличения податливости матрицы и накопления микроструктурных дефектов, ослабляющих связь между частицами наполнителя, поведение сферопластика приближается к поведению сыпучей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shutov F.A. *Syntactic polymer foams*. In: Chromatography/Foams/Copolymers. Advances in Polymer Science, Springer, Berlin, Heidelberg. – 1986. – Vol.73/74. – Pp.63-123.
2. Shivakumar K.N., Argade S.D., Sadler R.L., Sharpe M.M., Dunn L., Swaminathan G. et al. *Processing and properties of a lightweight fire resistant core material for sandwich structures* // Journal of Advanced Materials. – 2006. – Vol.38. – No.1. – Pp.32-38.
3. Rajapakse Y.D.S., Hui D. *Marine composites and sandwich structures* // Composites. Part B: Engineering. – 2008. – Vol.39. – No.1. – Pp.1-4.
4. Rajapakse Y.D.S., Hui D. *Marine composites: foreword* // Composites. Part B: Engineering. – 2004. – Vol.35. – No.6-8. – Pp.447-450.
5. Долматовский М.Г., Соколов И.И., Степанов А.В. *Разрушение и контроль сотовых конструкций со сферопластиками* // Конструкции из композиционных материалов. – 2009. – №2. – С.97-103.
6. Соколов И.И. *Сферопластики холодного отверждения на основе клеевых связующих для изделий авиационной техники* // Клеи. Герметики. Технологии. – 2013. – №3. – С.25-28.
7. Hu G., Yu D. *Tensile, thermal and dynamic mechanical properties of hollow polymer particle-filled epoxy syntactic foam* // Materials Science and Engineering. Part A. – 2011. – Vol.528. – Pp.5177-5183.

8. Yu. M., Zhu P., Ma Y. *Experimental study and numerical prediction of tensile strength properties and failure modes of hollow spheres filled syntactic foams* // Computational Materials Science. – 2012. – Vol.63. – Pp.232-243.
9. Huang R., Li P., Liu T. *X-ray microtomography and finite element modelling of compressive failure mechanism in cenosphere epoxy syntactic foams* // Composite Structures. – 2016. – Vol.140. – Pp.157-165.
10. Gupta N., Woldeesenbet E., Mensah P. *Compression properties of syntactic foams: effect of cenosphere radius ratio and specimen aspect ratio* // Composites. Part A. – 2004. – Vol.35. – No.1. – Pp.103-111.
11. Gupta N., Ye R., Porfiri M. *Comparison of tensile and compressive characteristics of vinyl ester/glass microballoon syntactic foams* // Composites: Part B. – 2010. – Vol.41. – Pp.236-245.
12. Атрошенко С.А., Кривошеев С.И., Петров Ю.В., Уткин А.А., Федоровский Г.Д. *Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках* // Журнал технической физики. – 2002. – Т.72. – №12. – С.54-58.
13. Bardella L., Sfreddo A., Ventura C., Porfiri M., Gupta N. *A critical evaluation of micromechanical models for syntactic foams* // Mechanics of Materials. – 2012. – Vol.50. – Pp.53-69.
14. Димитриенко Ю.И., Сборщиков С.В., Соколов А.П., Гафаров Б.Р., Садовничий Д.Н. *Численное и экспериментальное моделирование прочностных характеристик сферопластиков* // Композиты и наноструктуры. – 2013. – Т.19. – №3. – С.35-51.
15. Panteghini A., Bardella L. *On the compressive strength of glass microballoons-based syntactic foams* // Mechanics of Materials. – 2015. – Vol.82. – Pp.63-77.
16. Huang R., Li P. *Elastic behaviour and failure mechanism in epoxy syntactic foams: The effect of glass microballoon volume fractions* // Composites. Part B. – 2015. – Vol.78. – Pp.401-408.
17. Баев Л.В., Воротынцев А.А. *Отслоение матрицы от сферического включения* // Сибирский журнал индустриальной математики. – 1998. – Т.1. – №1. – С.35-40.
18. Nian G., Shan Y., Xu Q., Qu S., Qingda Yang Q. *Failure analysis of syntactic foams: A computational model with cohesive law and XFEM* // Composites. Part B. – 2016. – Vol.89. – Pp.18-26.
19. Swetha C., Kumar R. *Quasi-static uni-axial compression behaviour of hollow glass microspheres/epoxy based syntactic foams* // Materials and Design. – 2011. – Vol.32. – Pp.4152-4163.
20. Lia P., Petrinica N., Sivioura C.R., Frouda R., Reed J.M. *Strain rate dependent compressive properties of glass microballoon epoxy syntactic foams* // Materials Science and Engineering. Part. A. – 2009. – Vol.515. – Pp.19-25.
21. Аннин Б.Д., Демешкин А.Г., Карпов Е.В. *Различные механизмы разрушения сферопластика* // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 2010. – Т.337. – №53. – С.13-20.
22. Ревуженко А.Ф. *Механика упруго-пластических сред и нестандартный анализ*. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. – 428 с.
23. Стефанов Ю.П. *Режимы дилатансии и уплотнения развития деформации в зонах локализованного сдвига* // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т.13. – №S1. – С.44-52.

REFERENCES

1. Shutov F.A. *Syntactic polymer foams*. In: Chromatography/Foams/Copolymers. Advances in Polymer Science, Springer, Berlin, Heidelberg, 1986, Vol.73/74, Pp.63-123.
2. Shivakumar K.N., Argade S.D., Sadler R.L., Sharpe M.M., Dunn L., Swaminathan G. et al. *Processing and properties of a lightweight fire resistant core material for sandwich structures*. Journal of Advanced Materials, 2006, Vol.38, No.1, Pp.32-38.
3. Rajapakse Y.D.S., Hui D. *Marine composites and sandwich structures*. Composites. Part B: Engineering, 2008, Vol.39, No.1, Pp.1-4.
4. Rajapakse Y.D.S., Hui D. *Marine composites: foreword*. Composites. Part B: Engineering, 2004, Vol.35, No.6-8, Pp.447-450.
5. Dolmatovskii M.G., Sokolov I.I., Stepanov A.V. *Razrushenie i kontrol' sotovykh konstruksii so sferoplastikami [Destruction and control of honeycomb constructs with spheroplastics]*. Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov, 2009, No.2, Pp.97-103.
6. Sokolov I.I. *Microsphere foam with cold-cure adhesive bonding for aircraft equipment*. Polymer science. Series D, 2014, Vol.7, No.1, Pp.37-39.
7. Hu G., Yu D. *Tensile, thermal and dynamic mechanical properties of hollow polymer particle-filled epoxy syntactic foam*. Materials Science and Engineering. Part A, 2011, Vol.528, Pp.5177-5183.
8. Yu. M., Zhu P., Ma Y. *Experimental study and numerical prediction of tensile strength properties and failure modes of hollow spheres filled syntactic foams*. Computational Materials Science, 2012, Vol.63, Pp.232-243.
9. Huang R., Li P., Liu T. *X-ray microtomography and finite element modelling of compressive failure mechanism in cenosphere epoxy syntactic foams*. Composite Structures, 2016, Vol.140, Pp.157-165.
10. Gupta N., Woldesenbet E., Mensah P. *Compression properties of syntactic foams: effect of cenosphere radius ratio and specimen aspect ratio*. Composites. Part A, 2004, Vol.35, No.1, Pp.103-111.
11. Gupta N., Ye R., Porfiri M. *Comparison of tensile and compressive characteristics of vinyl ester/glass microballoon syntactic foams*. Composites: Part B, 2010, Vol.41, Pp.236-245.
12. Atroshenko S.A., Krivosheev S.I., Petrov Yu.V., Utkin A.A., Fedorovskiy G.D. *Fracture of spheroplastic under static and dynamic stressing*. Technical physics. The russian journal of applied physics, 2002, Vol.47, No.12, Pp.1538-1542.
13. Bardella L., Sfreddo A., Ventura C., Porfiri M., Gupta N. *A critical evaluation of micromechanical models for syntactic foams*. Mechanics of Materials, 2012, Vol.50, Pp.53-69.
14. Dimitrienko Iu.I., Sborshchikov S.V., Sokolov A.P., Gafarov B.R., Sadovnichii D.N. *Chislennoe i eksperimental'noe modelirovanie prochnostnykh kharakteristik sferoplastikov [Numerical and experimental modeling of spheroplastics strength characteristics]*. Kompozity i nanostruktury, 2013, Vol.19, No.3, Pp.35-51.
15. Panteghini A., Bardella L. *On the compressive strength of glass microballoons-based syntactic foams*. Mechanics of Materials, 2015, Vol.82, Pp.63-77.
16. Huang R., Li P. *Elastic behaviour and failure mechanism in epoxy syntactic foams: The effect of glass microballoon volume fractions*. Composites. Part B, 2015, Vol.78, Pp.401-408.

17. Baev L.V., Vorotyntsev A.A. *Otsloenie matritsy ot sfericheskogo vklucheniia [The separation of the matrix from the spherical inclusion]*. Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki, 1998, Vol.1, No.1, Pp.35-40.
18. Nian G., Shan Y., Xu Q., Qu S., Qingda Yang Q. *Failure analysis of syntactic foams: A computational model with cohesive law and XFEM*. Composites. Part B, 2016, Vol.89, Pp.18-26.
19. Swetha C., Kumar R. *Quasi-static uni-axial compression behaviour of hollow glass microspheres/epoxy based syntactic foams*. Materials and Design, 2011, Vol.32, Pp.4152-4163.
20. Lia P., Petrinica N., Sivioura C.R., Frouda R., Reed J.M. *Strain rate dependent compressive properties of glass microballoon epoxy syntactic foams*. Materials Science and Engineering. Part. A, 2009, Vol.515, Pp.19-25.
21. Annin B.D., Demeshkin A.G., Karpov E.V. *Razlichnye mekhanizmy razrusheniia sferoplasta [Various mechanisms of spheroplastic destruction]*. Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova, 2010, Vol.337, No.53, Pp.13-20.
22. Revuzhenko A.F. *Mekhanika uprugo-plasticheskikh sred i nestandartnyi analiz [Mechanics of elastic-plastic media and non-standard analysis]*. Novosibirsk, Izdatel'stvo Novosibirskogo universiteta, 2000, 428 p
23. Stefanov Yu.P. *Rezhimy dilatatsii i uplotneniia razvitiia deformatsii v zonakh lokalizovannogo sdviga [Modes of dilatancy and compaction of development of deformation in zones of localized shear]*. Fizicheskaiia mezomekhanika, 2010, Vol.13, No.S1, Pp.44-52.

Поступила в редакцию 30 октября 2017 года.

Сведения об авторе:

Карпов Евгений Викторович – д.ф.-м.н., с.н.с., ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: evkarpov@mail.ru