



## ТЕРМОРАСШИРЕНИЕ И УСАДКА ЭПОКСИДНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ ПРИ ВТОРИЧНОМ НАГРЕВЕ

Андрианова К.А., Аэрайгули Куомалибиекэ., Бубнов Д.А., Амирова Л.М.

Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ  
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия  
KAAndrianova@kai.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Эпоксидные пены, полученные путем терморасширения полимерных микросфер, перспективны в качестве заполнителей сэндвич-панелей. При вторичном нагреве эпоксидных пеноматериалов могут происходить процессы значительной усадки или терморасширения в зависимости от состава пен. Исследование и прогнозирование данных процессов необходимо для проектирования сэндвич-изделий с эпоксидным пенозаполнителем. **ЦЕЛЬ.** Исследование процессов термического расширения и усадки эпоксидных пенопластов при вторичном нагреве. Оценка давления, создаваемого в замкнутом пространстве оснастки за счет расширения. **МЕТОДЫ.** Для оценки температуры стеклования эпоксидных пенопластов использовался метод динамического механического анализа. Процесс вспенивания микросфер изучался методом термомеханического анализа. Оценка термического расширения и усадки производилась путем измерения линейных размеров и объема пенопласта до и после термической обработки. Оценка давления в процессе терморасширения пенопластов производилась с помощью датчиков давления и регистрировалась с помощью диэлектрической системы мониторинга процесса формования композитов DiatomPlus (INASCO). **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Показано, что при вторичном нагреве эпоксидных пенопластов может происходить усадка или расширение материала в зависимости от содержания микросфер. Давление терморасширения увеличивается с повышением плотности пенопласта. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Подобраны температурные условия вторичной термообработки и проведены исследования терморасширения эпоксидных пенопластов с различным содержанием микросфер и с различной начальной плотностью. Показано, что начальная минимальная плотность пенопласта снижается, а плотность после термообработки увеличивается с повышением концентрации микросфер. С повышением начальной плотности пенопласта при постоянной концентрации микросфер плотность пенопласта после термообработки снижается. Для пенопластов с большой начальной плотностью и большим содержанием микросфер наблюдается анизотропия расширения и сжатия после термообработки.

**Ключевые слова:** *тепловое расширение; эпоксидный пенопласт; терморасширяющиеся микросферы; усадка; плотность.*

**Благодарности:** *Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ. (Соглашение №15/2025-ПД-КАИ от 22.12.2025).*

**Для цитирования:** Андрианова К.А., Аэрайгули Куомалибиекэ, Бубнов Д.А., Амирова Л.М. Терморасширение и усадка эпоксидных пенопластов при вторичном нагреве // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 1. С. 168-178. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-168-178.

## THERMAL EXPANSION AND SHRINKAGE OF EPOXY FOAMS DURING SECONDARY HEATING

Andrianova K.A., Aerajguli Kuomalibieke., Bubnov D.A., Amirova L.M.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,  
Kazan, Russia  
KAAndrianova@kai.ru

**Abstract:** *RELEVANCE. Epoxy foams produced by thermal expansion of polymer microspheres show promise as sandwich panel cores. During secondary heating of epoxy foams, significant shrinkage or thermal expansion may occur, depending on the foam composition. Research and prediction of these processes is necessary for the design of sandwich products with epoxy foam cores. THE PURPOSE. To study the thermal expansion and shrinkage of epoxy foams during secondary heating. To estimate the pressure created in a confined tooling space due to expansion. METHODS. Dynamic mechanical analysis was used to estimate the glass transition temperature of epoxy foams. The foaming process of microspheres was studied using thermomechanical analysis. Thermal expansion and shrinkage were assessed by measuring the linear dimensions and volume of the foam before and after heat treatment. The pressure during the thermal expansion of foam plastics was assessed using pressure sensors and recorded using the DiamonPlus dielectric composite molding process monitoring system (INASCO). RESULTS. It was shown that secondary heating of epoxy foam plastics can cause shrinkage or expansion of the material depending on the microsphere content. Thermal expansion pressure increases with increasing foam plastic density. CONCLUSIONS. The temperature conditions for secondary heat treatment were selected, and thermal expansion studies were conducted for epoxy foam plastics with different microsphere contents and initial densities. It was shown that the initial minimum foam density decreases, while the density after heat treatment increases with increasing microsphere concentration. With an increase in the initial foam plastic density at a constant microsphere concentration, the foam plastic density after heat treatment decreases. For foam plastics with a high initial density and a high microsphere content, anisotropy of expansion and contraction after heat treatment is observed.*

**Keywords:** *thermal expansion; epoxy foam; thermally expanding microspheres; shrinkage; density.*

**Acknowledgments:** *This work was funded by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan provided to higher education institutions, scientific and other organizations to support human resource development plans in terms of encouraging their research and academic staff to defend doctoral dissertations and conduct research activities." (Agreement No. 15/2025-PD-KAI dated December 22, 2025).*

**For citation:** Andrianova K.A., Aerajguli Kuomalibieke, Bubnov D.A., Amirova L.M. Thermal expansion and shrinkage of epoxy foams during secondary heating. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (1): 168-178. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-1-168-178.

### **Введение (Introduction)**

Полимерные пены широко применяются практически во всех областях промышленности: авиации, машиностроении, строительстве, энергетике, благодаря своим высоким шумо- и теплоизоляционным характеристикам, энергопоглощению и другим ценным свойствам [1-6].

Полимерные пенопласты удовлетворяют жестким требованиям теплоизоляции криогенных материалов, что имеет большое значение для охлаждения различных электронных устройств [7]. Однако при этом необходимо учитывать тепловое расширение пенопластов, которое зависит не только от плотности пены [8], но и от направления вспенивания [9]. Уменьшение и компенсация теплового расширения пенопластов требует разработки различных технологических приемов, что является одной из актуальных задач в области получения полимерных пен [10]. С другой стороны, тепловое расширение пенопластов является необходимым условием при формировании сэндвич-панелей с пенопластовым наполнителем с помощью технологии формирования с термическим расширением сердечника [11]. Технология основана на возможности расширения пенопластового сердечника при повышенной температуре и создании давления на слои препрега внутри замкнутой формообразующей оснастки. Таким образом, исследование процесса теплового расширения полимерных пен и управление данным процессом является актуальной задачей во многих областях техники.

Существует большое количество типов полимерных пен и способов вспенивания полимеров [12]. Среди них эпоксидные пены занимают особое место благодаря высоким механическим характеристикам и адгезионной прочности [13]. На основе эпоксидных полимеров можно получать высокотемпературные пены и сэндвич изделия [14], они

перспективны и для получения покрытий, в том числе наносимых методом электростатического напыления [15]. Эпоксидные пены, особенно полученные методом физического вспенивания за счет терморасширения полимерных микросфер перспективны в качестве сердечников для сэндвич-конструкций сложной формы [16]. Они характеризуются хорошей адгезией к обшивке, прочностью на сжатие и ударостойкостью.

Ранее нами были разработаны и запатентованы составы эпоксидных композиций с терморасширяющимися микросферами и способ получения эпоксидного пенопласта на их основе [17]. Предложена технология ихготовления сэндвич изделия с эпоксидным пенопластовым сердечником [18, 19] и рассмотрены области их применения [20]. Было показано, что формование сэндвич изделий с помощью технологии формования с термическим расширением пенопластового сердечника – это экономически эффективная технология изготовления композитных конструкций, позволяющая создавать изделия сложной формы. Однако остаются не до конца решенными вопросы, связанные с влиянием состава и температуры на процесс теплового расширения эпоксидных пен, полученных на основе композиций с терморасширяющимися микросферами [21].

В данной работе была поставлена задача исследовать процесс термического расширения и усадки разработанных ранее эпоксидных пенопластов, а также оценить давление, создаваемое в замкнутом пространстве оснастки за счет этого расширения.

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Эпоксидные пенопласты получали на основе смесей твердых и жидких эпоксидных смол. В качестве твердой эпоксидной смолы использовали смолу марки D.E.R.671 (эпоксидное число ЭЧ = 8-9%, температура размягчения 75-85°C). В качестве жидкой эпоксидной смолы с отвердителем использовали двухкомпонентное эпоксидное связующее фирмы ИТЕКМА марки Т20-60 (г. Москва). В качестве физического вспенивающего агента были использованы полимерные терморасширяющиеся микросферы Expancel DU120. Измельчение твердой эпоксидной смолы проводили в центробежной мельнице Retsch ZM 200 до получения однородного порошка. Смешение сухих и жидких компонентов проводилось в планетарном смесителе Bosch Mum Serie 2 MUMS2ER01 со скоростью смешения 200-500 об/мин в течение 10-15 минут.

Процесс вспенивания полимерных микросфер изучали с помощью термомеханического анализатора ТМА 402 F1 Hyperion (Netzsch) при скорости нагрева 1°C/мин.

Оценка теплостойкости эпоксидных пен проводилась на динамическом механическом анализаторе DMA Q800 (TA Instruments). Образцы эпоксидных пен в виде дисков толщиной до 8 мм подвергались деформации на сжатие между двумя параллельными пластинами. Скорость нагрева составляла 5°C/мин, частота – 1 Гц, амплитуда деформации – 0,1%. Температура стеклования отвержденных полимеров определялась из температурной зависимости модуля упругости по ГОСТ Р 57739-2017.

Для вспенивания эпоксидных композиций были изготовлены специальные оснастки для получения образцов прямоугольной и цилиндрической формы. Давление, создаваемое при нагреве пенопласта в закрытой форме, определяли с помощью датчиков давления марки ХРС10-М-20BS-/L4М. Измерение давления проводили с помощью диэлектрической системы мониторинга процесса формования композитов DiamonPlus (INASCO).



Рис. 1. Металлические оснастки для вспенивания: *Fig. 1. Metal mold tool for foaming: a – rectangular mold tool t; b – cylindrical mold tool with a pressure sensor*  
а – оснастка прямоугольной формы; б – цилиндрическая оснастка с датчиком давления

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для исследования теплового расширения были изготовлены образцы пенопластов в виде пластин размером 17×12 мм (рис. 2а) и в виде цилиндров диаметром 50 мм и высотой 50 мм (рис. 2б). Так как после термообработки образцы в виде пластин подвергались сильному короблению, в некоторых случаях приводящему к разрушению пенопласта, для изучения влияния термообработки на изменение геометрических размеров использовали образцы только цилиндрической формы.

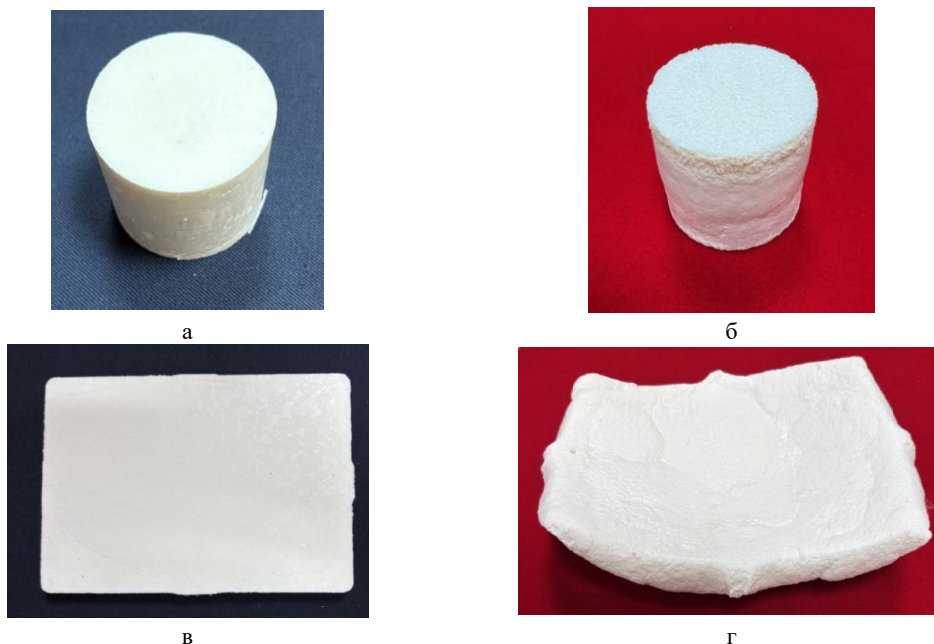


Рис. 2. Внешний вид образцов эпоксидных пен до (а, в) и после (б, г) термообработки

Fig. 2. Appearance of epoxy foam samples before (a, c) and after (b, d) heat treatment

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Плотность пенопластов ( $\rho$ ) до и после термообработки определяли по массе и геометрическим параметрам образца.

Тепловое расширение эпоксидных пен определяли по изменению линейных размеров цилиндрических образцов при нагревании.

**Результаты (Results)**

Для выбора температуры вторичного нагрева (термообработки) необходимо было определить температуру стеклования эпоксидного пенопласта. На рисунке 3 приведены зависимости модуля упругости и тангенса угла механических потерь эпоксидного пенопласта с микросферами DU120 от температуры, полученные на динамическом механическом анализаторе. Плотность пенопласта составляет 31 кг/м<sup>3</sup>, концентрация микросфер 45%. Из рисунка 3 видно, что при температуре 120°C пенопласт полностью расстекловывается, поэтому термообработку проводили при данной температуре. Кроме того, для микросфер марки DU120, используемых в составе пенопласта, максимум вспенивания наблюдается также при T=120°C, как это видно из термомеханической кривой, показанной на рисунке 4.

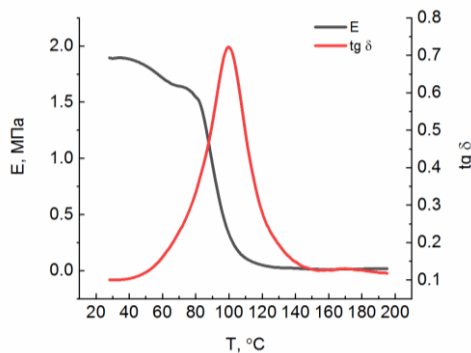


Рис. 3. Зависимость модуля упругости и тангенса угла механических потерь эпоксидного пенопласта от температуры

Fig. 3. Temperature dependence of the elasticity modulus and tg  $\delta$  of the epoxy foam

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

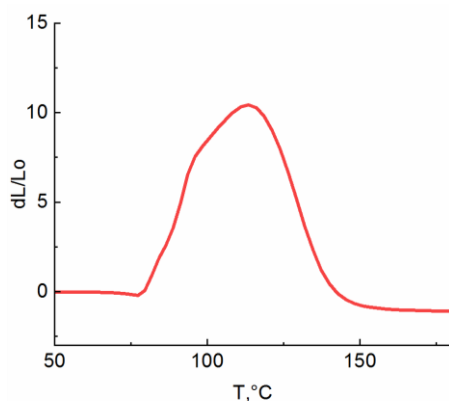


Рис. 4. Термомеханическая кривая Fig. 4. Thermomechanical curve of DU120 терморасширения микросфер марки DU120 microspheres thermal expansion

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для изучения процесса терморасширения при вторичной термообработке получали эпоксидные пенопласты с различной плотностью и с различным содержанием микросфер марки DU120 по технологии, подробно описанной в работе [20]. Необходимо отметить, что минимальное значение плотности зависит от содержания микросфер. На рисунке 5 (черная кривая) представлены данные по минимальной плотности эпоксидных пенопластов при различных содержаниях микросфер DU120. Из рисунка видно, что с повышением содержания микросфер плотность эпоксидного пенопласта экспоненциально снижается, в пределах от плотности эпоксидного полимера ( $1.2 \text{ кг/м}^3$ ) до плотности микросфер ( $15 \text{ кг/м}^3$ ).

Для выявления закономерностей влияния вторичного нагрева на плотность пенопластов полученные пенопласты были термообработаны при температуре  $120^\circ\text{C}$  и после охлаждения определены их плотности. На рисунке 5 (красная кривая) приведены значения плотностей термообработанных образцов. Из рисунка видно, что плотность термообработанных пенопластов с повышением содержания микросфер вначале немного снижается, затем, в области концентраций 30-40% снова повышается и практически выходит на предел.

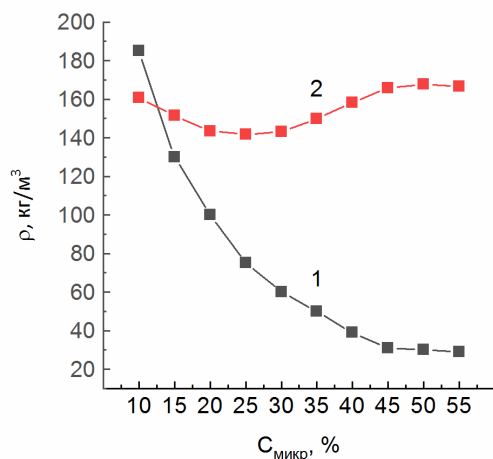


Рис. 5. Зависимость минимальной плотности (1) и Fig. 5. Dependence of the minimum density (1) and плотности после термообработки (2) эпоксидного density after heat treatment (2) of epoxy foam based пенопласта на основе состава T20-60/D.E.R.671/DU120 on the composition T20-60/D.E.R.671/DU120 on the concentration of microspheres

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

С учетом того, что плотность эпоксидного полимера в пенопластах при термообработке практически не меняется ( $1.2 \text{ кг/м}^3$ ), были рассчитаны плотности микросфер в составе эпоксидных пенопластов до и после термической обработки (рис. 6). Из рисунка 6 видно, что плотность микросфер в пенопластах с максимальным расширением уменьшается до предельного значения  $15 \text{ кг/м}^3$  с повышением концентрации микросфер, однако после термической обработки плотность микросфер увеличивается с повышением концентрации микросфер. Это видимо связано с тем, что с повышением концентрации

микрофер уменьшается толщина эпоксидной перегородки между микроферами, это приводит к тому, что при вспенивании пенопласта эпоксидный полимер оказывает меньшее сопротивление как вспениванию микрофер, так и улетучиванию газа-вспенивателя. При вторичной термообработке микроферы с меньшим количеством оставшегося газа начинают сжиматься, а уменьшение толщины перегородки из эпоксидного полимера оказывает меньшее сопротивление усадке полимера. Пенопласты с микроферами с большим количеством газа могут, наоборот, расширяться.

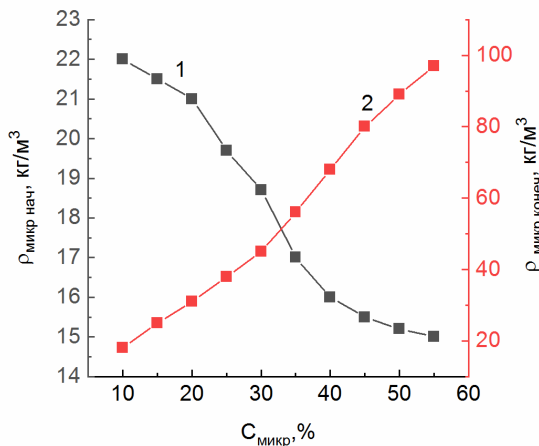


Рис. 6. Плотность микрофер в предельно вспененных пенопластах с различным содержанием микрофер до (1) и после (2) термической обработки

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основе эпоксидных композиций с содержанием микрофер в интервале 10-55% были получены пенопласты с плотностями выше минимальных и исследовано их поведение при термообработке. Для пенопластов с содержанием микрофер более 40% были отмечены некоторые особенности изменения геометрических размеров пен при термической обработке. В таблице 1 в качестве примера приведены характеристики пенопластов, содержащих 45% микрофер, с различной начальной плотностью до и после термической обработки при 120°C. Из таблицы 1 видно, что пенопласты с начальной плотностью менее 100 кг/м<sup>3</sup> сжимаются. Причем с уменьшением начальной плотности конечная плотность пенопласта увеличивается. Для пенопластов с начальной плотностью выше 100 кг/м<sup>3</sup> при термообработке наблюдается расширение. Отмечается небольшая анизотропия в изменении линейных размеров: высота пенопластов при минимальных плотностях имеет больший процент сжатия по сравнению с диаметром (D), в то время как при больших плотностях диаметр имеет больший процент расширения по сравнению с высотой образца (H). В литературе также отмечается аналогичная анизотропия для ряда пенопластов [8-10].

Таблица 1  
Table 1

Характеристики пенопластов с содержанием микрофер 45%  
Characteristics of foam plastics with a microsphere content of 45%

Начальная плотность пенопласта, кг/м <sup>3</sup>	Плотность пенопласта после т/о 120°C, кг/м <sup>3</sup>	Начальная плотность микрофер, кг/м <sup>3</sup>	Плотность микрофер после т/о 120°C, кг/м <sup>3</sup>	Изменение D, %	Изменение H, %
31	170	15.5	83	-33	-38
56	151	25	80	-29	-33
78	117	33	54	-12	-15
106	95	49	48	2	-1
155	86	75	40	21	17
206	76	101	38	36	34

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При термообработке пенопластов с плотностью 205-206 кг/м<sup>3</sup> плотность получаемого пенопласта зависит от содержания микрофер (табл. 2). Из таблицы 2 видно, что с повышением концентрации микрофер плотность получаемого пенопласта уменьшается, что вполне логично. Однако при этом конечная плотность микрофер снижается с

уменьшением содержания микросфер. По-видимому, в пенопластах с уменьшением содержанием микросфер толщина оксидной полимерной стенки между микросферами увеличивается и, следовательно, затрудняется испарение газа-вспенивателя, который как раз обеспечивает вспенивание микросфер.

Таблица 2

Table 2

Характеристики пенопластов с начальной плотностью 205-206 кг/м<sup>3</sup> с различным содержанием микросфер

*Characteristics of foam plastics with an initial density of 205-206 kg/m<sup>3</sup> with different microsphere content*

Содержание микросфер, %	Плотность пенопласта после т/о 120°С, кг/м <sup>3</sup>	Начальная плотность микросфер, кг/м <sup>3</sup>	Плотность микросфер после т/о 120°С, кг/м <sup>3</sup>	Изменение D, %	Изменение H, %
10	156	25	18	9.5	10
15	122	36	20	13	13
20	107	46	23	17	16
25	98	57	26	21	20
30	94	68	30	24	23
35	87	78	32	28	26
40	84	89	35	32	30
45	76	101	38	36	34

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, поведение оксидных пенопластов при термической обработке зависит как от их плотности, так и от содержания микросфер. Это необходимо учитывать при использовании подобных пенопластов в различных изделиях, в частности при изготовлении пенопластовых сердечников для сэндвич-изделий с композитной обшивкой. Одним из наиболее перспективных способов для получения сэндвич изделий сложной геометрии является формование под давлением терморасширения предварительно вспененного пенопластового сердечника [22, 23]. Для формования композитной обшивки сэндвич-изделия важно знать величину давления, создаваемого пенопластовым сердечником при заданной температуре.

В данной работе изучалось изменение давления, создаваемое пенопластом в закрытой форме, при температуре 120°С. Данная температура является приемлемой температурой отверждения промышленных препрегов на основе оксидных связующих и стекло- и углетканей. Поэтому изучение давления, создаваемого пенопластами для формования высокопрочных армированных композитных обшивок сэндвич изделий, представляет не только научный, но и практический интерес.

При термообработке пенопластов в закрытой форме за счет терморасширения создается давление, которое регистрировалось во времени при температуре 120°С. На рисунке 7 в качестве примера показана динамика изменения давления в закрытой форме с пенопластами различной начальной плотности. Содержание микросфер составляло 45%.

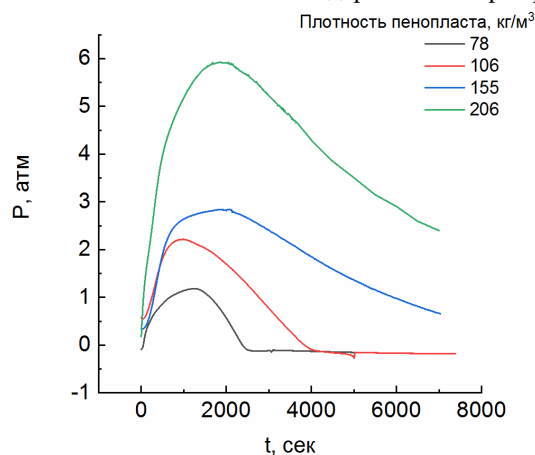


Рис. 7. Давление терморасширения для пенопластов с содержанием микросфер 45% при начальной плотности (кг/м<sup>3</sup>): 1 – 78, 2 – 106, 3 – 155, 4 – 206

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 7 видно, что давление терморасширения увеличивается с повышением плотности пенопласта. Давление терморасширения после достижения максимума начинает снижаться, скорость снижения давления повышается с уменьшением плотности пенопласта.

Концентрация микросфер также влияет на давление терморасширения, на рисунке 8 приведены диаграммы изменения давления эпоксидных пен с разной концентрацией микросфер при равной плотности пенопласта (примерно 205-206 кг/м<sup>3</sup>).

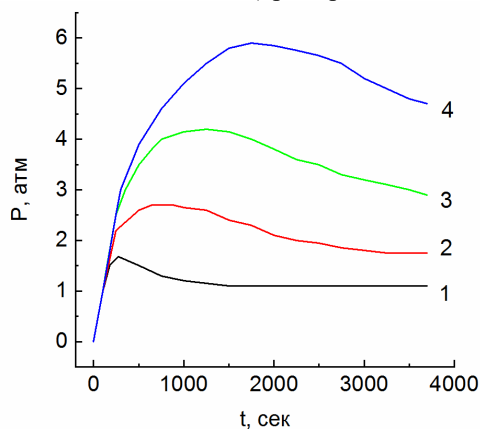


Рис. 8. Давление терморасширения для пенопластов с плотностью 205-205 кг/м<sup>3</sup> с разной концентрацией микросфер: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 45%  
 Fig. 8. Thermal expansion pressure for foams with a density of 205-205 kg/m<sup>3</sup> with different concentrations of microspheres: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 45%

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 8 видно, что с повышением концентрации микросфер давление, создаваемое пенопластом за счет терморасширения, растет, так как плотность пенопласта при терморасширении снижается сильнее с увеличением концентрации микросфер как показано в таблице 2. Таким образом, давление терморасширения можно регулировать, изменяя плотность эпоксидных пенопластов или концентрацию микросфер.

#### Выводы (Conclusions)

1. На основании данных динамического механического анализа и термомеханического анализа эпоксидных пенопластов и терморасширяющихся микросфер подобраны температурные условия вторичной термообработки и проведены исследования терморасширения эпоксидных пенопластов с различным содержанием микросфер и с различной начальной плотностью.

2. Для пенопластов с минимально возможной плотностью получены зависимости начальной плотности и плотности после термообработки от концентрации микросфер. Показано, что начальная минимальная плотность пенопласта снижается, а плотность после термообработки увеличивается с повышением концентрации микросфер.

3. С повышением начальной плотности пенопласта при постоянной концентрации микросфер плотность пенопласта после термообработки снижается. Для пенопластов с большой начальной плотностью и большим содержанием микросфер наблюдается анизотропия расширения и сжатия после термообработки.

4. Для пенопластов с одинаковой начальной плотностью плотность пенопласта после термообработки снижается с повышением концентрации микросфер. В то время как плотность микросфер после термической обработки снижается при уменьшении концентрации микросфер в пенопласте.

#### Литература

1. Taskin O. S. Polymeric Foams: Materials, Technology, and Applications // Polymeric Foams: Applications of Polymeric Foams (Volume 2). American Chemical Society, 2023. С. 51-63.
2. Wu G. et al. A review of thermoplastic polymer foams for functional applications // Journal of Materials Science. 2021. Т. 56. №. 20. С. 11579-11604.
3. Naderi G. et al. Polymer Foams for Energy Applications: Storage, Harvesting, Dissipation, and Conversion // Polymer Engineering & Science. 2025. Т.66. № 11. С. 7-42.
4. Pattarakunnan K. et al. Impact damage tolerance of energy storage composite structures containing lithium-ion polymer batteries // Composite Structures. 2021. Т. 267. С. 113845.
5. Pattarakunnan K. et al. Thermal Performance of Energy Storage Sandwich Composites Containing Lithium-Ion Polymer Batteries // Applied Composite Materials. 2025. С. 1-33.

6. Wang X. et al. Experimental study on post-impact loading of composite sandwich-structured batteries // Optics & Laser Technology. 2025. Т. 186. С. 112637
7. Soni P. et al. Progress in innovative technologies in thermal insulation for cryogenic applications // Energy. 2025. С. 138658.
8. Rodríguez-Pérez M. A. et al. Thermal expansion of crosslinked closed-cell polyethylene foams // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 1998. Т. 36. №. 14. С. 2587-2596
9. Andersons J. et al. Anisotropic thermal expansion of bio-based rigid low-density closed-cell polyurethane foams // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Т. 16. С. 1517-1525.
10. Rodríguez-Pérez M. A., González-Peña J. I., de Saja J. A. Anisotropic and heterogeneous thermal expansion of polyethylene foam blocks: Effect of thermal treatments // European polymer journal. 2007. Т. 43. №. 10. С. 4474-4485.
11. Qin Y. et al. Preparation of thermal expandable epoxy resin and properties of foam sandwich composites formed by thermal expansion molding process // Polymer Composites. 2024. Т. 45. №. 9. С. 8345-8359.
12. Krishnan V. G. et al. Characterizing the foaming process of polymers: Review of experimental methods // Advances in Colloid and Interface Science. 2025. С. 103579.
13. Kwon D. J. et al. Optimized epoxy foam interface of CFRP/Epoxy Foam/CFRP sandwich composites for improving compressive and impact properties // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Т. 11. С. 62-71.
14. Peng Z. et al. Preparation and evaluation of the high-temperature-resistant epoxy resin with thermal expansion properties enables Z-axis reinforcement // Composites Communications. 2025. Т. 56. С. 102372.
15. Воронцов С. А., Галимова Н. Я., Тукбаев Э. Р. Исследование тепловых процессов при нанесении полимерных порошковых покрытий электростатико-термогазодинамическим способом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. №. 3-4. С. 106-111.
16. Chen Y., Das R. A review on manufacture of polymeric foam cores for sandwich structures of complex shape in automotive applications // Journal of Sandwich Structures & Materials. 2022. Т. 24. №. 1. С. 789-819.
17. Пат. РФ 2845736. Эпоксидный пенопласт, способ получения эпоксидного пенопласта (варианты) и способ получения сэндвич-изделия из эпоксидного пенопласта (варианты). Куомалибиекэ А., Мигранов Т.И., Андрианова К.А., Амирова Л.М. Оpubл. 25.08.2025 Бюл. № 24.
18. Пат. РФ 2852337. Способ получения сэндвич-изделия Куомалибиекэ А., Мигранов Т.И., Андрианова К.А., Амирова Л.М. Оpubл. 08.12.2025 Бюл. № 34.
19. Пат. РФ 2852526. Способ получения сэндвич-изделия из эпоксидного пенопласта. А. Куомалибиекэ, Мигранов Т.И., Андрианова К.А., Амирова Л.М. Оpubл. 09.12.2025 Бюл. № 34.
20. Kuomalibieke A. et al. Epoxy Polymer Based Foam Fillers and Sandwich Structures with a Core Based on Them // Russian Aeronautics. 2025. Т. 68. №. 2. С. 463-470.
21. Peng Y. et al. Interfacial Delamination and Corresponding Mechanisms of Integrated Sandwich Composite Structure Fabricated Via Internal Thermal Expansion Technique // Applied Composite Materials. 2026. Т. 33. №. 1. С. 17.
22. Lee C. S. et al. Co-cure bonding method for foam core composite sandwich manufacturing // Composite structures. 2004. Т. 66. №. 1-4. С. 231-238.
23. Sun Z. et al. Effect of expansion rate on interfacial mechanical properties and failure mechanism of sandwich composites prepared via thermal expansion molding process // Engineering Failure Analysis. 2024. Т. 161. С. 108246.

#### Авторы публикации

**Андрианова Кристина Александровна** – канд. техн. наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *ORCID*\*: <http://orcid.org/0000-0001-9011-6856>. *KAAndrianova@kai.ru*

**Аэрайгули Куомалибиекэ** – аспирант кафедры производства летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *arai0415@mail.ru*

**Бубнов Денис Альбертович** – аспирант кафедры производства летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *DABubnov@kai.ru*

**Амирова Лилия Миниахмедовна** – д-р хим. наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *ORCID\**: <http://orcid.org/0009-0008-7605-2743/>. [amirovaliliyam@mail.ru](mailto:amirovaliliyam@mail.ru)

#### References

1. Taskin O. S. Polymeric Foams: Materials, Technology, and Applications // Polymeric Foams: Applications of Polymeric Foams (Volume 2). American Chemical Society, 2023. C. 51-63.
2. Wu G. et al. A review of thermoplastic polymer foams for functional applications // Journal of Materials Science. 2021. T. 56. №. 20. C. 11579-11604.
3. Naderi G. et al. Polymer Foams for Energy Applications: Storage, Harvesting, Dissipation, and Conversion // Polymer Engineering & Science. 2025. T.66. № 11. C. 7-42.
4. Pattarakunna K. et al. Impact damage tolerance of energy storage composite structures containing lithium-ion polymer batteries // Composite Structures. 2021. T. 267. C. 113845.
5. Pattarakunna K. et al. Thermal Performance of Energy Storage Sandwich Composites Containing Lithium-Ion Polymer Batteries // Applied Composite Materials. 2025. C. 1-33.
6. Wang X. et al. Experimental study on post-impact loading of composite sandwich-structured batteries // Optics & Laser Technology. 2025. T. 186. C. 112637
7. Soni P. et al. Progress in innovative technologies in thermal insulation for cryogenic applications //Energy. 2025. C. 138658.
8. Rodríguez-Pérez M. A. et al. Thermal expansion of crosslinked closed-cell polyethylene foams // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 1998. T. 36. №. 14. C. 2587-2596
9. Andersons J. et al. Anisotropic thermal expansion of bio-based rigid low-density closed-cell polyurethane foams // Journal of Materials Research and Technology. 2022. T. 16. C. 1517-1525.
10. Rodríguez-Pérez M. A., González-Peña J. I., de Saja J. A. Anisotropic and heterogeneous thermal expansion of polyethylene foam blocks: Effect of thermal treatments // European polymer journal. 2007. T. 43. №. 10. C. 4474-4485.
11. Qin Y. et al. Preparation of thermal expandable epoxy resin and properties of foam sandwich composites formed by thermal expansion molding process //Polymer Composites. 2024. T. 45. №. 9. C. 8345-8359.
12. Krishnan V. G. et al. Characterizing the foaming process of polymers: Review of experimental methods // Advances in Colloid and Interface Science. 2025. C. 103579.
13. Kwon D. J. et al. Optimized epoxy foam interface of CFRP/Epoxy Foam/CFRP sandwich composites for improving compressive and impact properties // Journal of Materials Research and Technology. 2021. T. 11. C. 62-71.
14. Peng Z. et al. Preparation and evaluation of the high-temperature-resistant epoxy resin with thermal expansion properties enables Z-axis reinforcement // Composites Communications. 2025. T. 56. C. 102372.
15. Voroncov S. A., Galimova N. Ya., Tukbayev E. R. Issledovaniye teplovih processov pri nanesenii polimernih poroshkovih pokrytiy electrostatico-termogazodinamicheskim sposobom // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemi energetiki. 2011. №. 3-4. S. 106-111. (In Russ)
16. Chen Y., Das R. A review on manufacture of polymeric foam cores for sandwich structures of complex shape in automotive applications // Journal of Sandwich Structures & Materials. 2022. T. 24. №. 1. C. 789-819.
17. Pat. RF 2845736. Epoksidniy penoplast, sposob polucheniya epoksidnogo penoplasta (varianti) i sposob polucheniya sandvich-izdeliya iz epoksidnogo penoplasta (varianti). Kuomalibieke A., Migranov T.I., Andrianova K.A., Amirova L.M. Opubl. 25.08.2025 Bul. № 24. (In Russ)
18. Pat. RF 2852337. Sposob polucheniya sandvich-izdeliya. Kuomalibieke A., Migranov T.I., Andrianova K.A., Amirova L.M.. Opubl. 08.12.2025 Bul. № 34. (In Russ)
19. Pat. RF 2852526. Sposob polucheniya sandvich-izdeliya iz epoksidnogo penoplasta. Kuomalibieke A., Migranov T.I., Andrianova K.A., Amirova L.M. Opubl. 09.12.2025 Bul. № 34. (In Russ)
20. Kuomalibieke A. et al. Epoxy Polymer Based Foam Fillers and Sandwich Structures with a Core Based on Them // Russian Aeronautics. 2025. T. 68. №. 2. C. 463-470.
21. Peng Y. et al. Interfacial Delamination and Corresponding Mechanisms of Integrated Sandwich Composite Structure Fabricated Via Internal Thermal Expansion Technique // Applied Composite Materials. 2026. T. 33. №. 1. C. 17.
22. Lee C. S. et al. Co-cure bonding method for foam core composite sandwich manufacturing // Composite structures. 2004. T. 66. №. 1-4. C. 231-238.
23. Sun Z. et al. Effect of expansion rate on interfacial mechanical properties and failure mechanism of sandwich composites prepared via thermal expansion molding process // Engineering Failure Analysis. 2024. T. 161. C. 108246.

**Authors of the publication**

**Kristina A. Andrianova** – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0000-0001-9011-6856>. *KAAndrianova@kai.ru*

**Aeraiguli Kuomalibieke** – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *arai0415@mail.ru*

**Denis A. Bubnov** – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *DABubnov@kai.ru*

**Liliya M. Amirova** – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *ORCID\**: <http://orcid.org/0009-0008-7605-2743/>. *amirovaliliyam@mail.ru*

*Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника*

**Получено** **14.01.2026 г.**

**Отредактировано** **26.01.2026 г.**

**Принято** **13.02.2026 г.**