

ОБЗОРЫ

УДК 678

**СОВРЕМЕННЫЕ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ
ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ****Колосова А.С., Пикалов Е.С.***ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru*

Газонаполненные пластмассы и эластомеры представляют собой одну из наиболее широко распространенных в самых разных областях человеческой деятельности и активно развивающихся групп полимерных материалов и изделий, в которых дисперсной фазой является газ, а основу сплошной фазы составляет полимер. Распространенность и перспективность рассматриваемой группы полимерных композиционных материалов объясняется сочетанием теплоизоляционных свойств с другими характеристиками, которые зависят от состава, структуры и технологии получения материала. В данной работе представлена классификация газонаполненных полимерных материалов в зависимости от типа газоструктурного элемента, состава и свойств. Рассматриваются разновидности газонаполненных пластмасс, пеноэластомеров и изделий из них, приведена характеристика, области применения, составы сырьевых смесей и технологии получения наиболее распространенных и востребованных на сегодняшний день газонаполненных полимеров: пенополиуретанов, пенополиизоциануратов, пенокарбамидов, пенофенопластов, пеноэпоксидов, пенополиимидов, пенополистиролов, пенополиэтиленов, пенополивинилхлоридов, пенополипропиленов, пенорезин и пеносиликонов. Отдельно рассматриваются интегральные пенопласты, синтактические пенопласты, сотопласты, материалы из полимерных волокон и воздушно-пузырчатые пленки. Представленная информация позволяет оценить разнообразие газонаполненных полимерных материалов и изделий, их основные преимущества и недостатки для разных областей применения.

Ключевые слова: газонаполненные пластмассы, пенополиуретан, пенополистирол, интегральные пенопласты, синтактические пенопласты, сотопласты, пеноэластомеры

MODERN GAS-FILLED POLYMER MATERIALS AND PRODUCTS**Kolosova A.S., Pikalov E.S.***Vladimir State University of a name of Alexander Grigorevich and Nikolay Grigorevich Stoletovs, Vladimir, e-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru*

Gas-filled plastics and elastomers are one of the most widely distributed in various fields of human activity and actively developing groups of polymer materials and products, in which the dispersed phase is a gas, and the solid phase is based on a polymer. The prevalence and prospects of the considered group of polymer composite materials are explained by the combination of thermal insulation properties with other characteristics that depend on the composition, structure and technology of obtaining the material. This paper presents a classification of gas-filled polymer materials depending on the type of gas-structured element, composition and properties. Discusses the varieties of gas-filled plastics, foamed elastomers and articles made therefrom, the characteristics, the field of application, the compositions of raw mixtures and the technology of the most common and popular today, gas-filled polymers: polyurethane foams, polyisocyanurates foams, carbamide foams, phenolic foams, epoxy foams, polyimide foams, expanded polystyrene, expanded polyethylene, expanded polyvinylchloride, expanded polypropylene, rubber foam and organosilicon foam. Integrated foams, syntactic foams, honeycombed plastic, polymer fiber materials and air-bubble films are considered separately. This information allows us to evaluate the variety of gas-filled polymer materials and products, their main advantages and disadvantages for different applications.

Keywords: gas-filled plastics, polyurethane foam, expanded polystyrene, integrated foams, syntactic foams, honeycombed plastic, foamed elastomer

На сегодняшний день полимеры являются одними из самых распространенных и востребованных материалов, которые широко применяются практически повсеместно, а темпы их производства и объемы потребления с каждым годом повышаются. Это связано с большим количеством разновидностей натуральных и синтетических полимеров, которые отличаются по составу, структуре, свойствам и способам переработки в изделия. Для многих полимеров характерны широкие возможности по сополимеризации и модификации различными добавками, что не только расширяет

возможности их производства и применения, но и позволяет получать полимерные композиционные материалы, в которых можно эффективно комбинировать свойства полимерных связующих и различных наполнителей.

Среди композиционных материалов на полимерных связующих особое место за счет сочетания теплоизоляционных свойств с другими показателями занимают газонаполненные (вспененные, ячеистые, теплоизоляционные) пластмассы и эластомеры, в которых, как следует из названия, дисперсной фазой являет-

ся газ, а основу сплошной фазы составляют полимерные материалы, находящиеся при температурах эксплуатации в твердом (пластмассы) или высокоэластичном (эластомеры) состояниях. Как и в случае с другими полимерными композиционными материалами, газонаполненные пластмассы получают на основе термопластов и реактопластов (терморектопласты, терморективные пластмассы) [1, 2].

Цель данной работы заключалась в рассмотрении наиболее распространенных групп газонаполненных полимерных материалов и изделий, их составов и методов получения, преимуществ и недостатков, а также областей применения.

Классификация и общая характеристика газонаполненных пластмасс

Существует несколько вариантов классификации газонаполненных пластмасс. В зависимости от плотности газонаполненные пластмассы подразделяют на сверхлегкие ($\rho < 10 \text{ кг/м}^3$), легкие ($\rho = 10\text{--}500 \text{ кг/м}^3$) и облегченные ($\rho > 500 \text{ кг/м}^3$). В зависимости от напряжения сжатия при 50%-ной деформации газонаполненные пластмассы делятся на эластичные или мягкие (напряжение менее 0,01 МПа), полужесткие (напряжение 0,01–0,15 МПа) и жесткие или твердые (напряжение свыше 0,15 МПа). При этом модуль упругости для эластичных газонаполненных пластмасс превышает 1000 МПа, а для жестких – менее 100 МПа. Для классификации газонаполненных пластмасс также используют термин «газоструктурный элемент» (ГСЭ), под которым понимается объем (газовая ячейка), ограниченный стенками, ребрами (тяжами) и повторяющийся в структуре материала с определенной периодичностью. В зависимости от типа ГСЭ, которые составляют структуру газонаполненных пластмасс, различают:

– ячеистые пенопласты, состоящие из изолированных ГСЭ;

– поропласты, состоящие из сообщающихся ГСЭ, в стенках которых имеется как минимум два отверстия. Поропласты, у которых стенки ячеек отсутствуют и структура представлена каркасом из ребер ГСЭ, называют сетчатыми, ретикулярными или ретикулированными;

– синтактные (синтактические, микробаллонные) пенопласты, в которых ГСЭ представляют собой микросферы, равномерно наполняющие полимерное связующее;

– сотовые пенопласты (сотопласты), в которых ГСЭ представляет собой ячейку в форме правильного шестигранника (соты) или другой геометрической фигуры;

– поропласты с капиллярными (волоконистыми) ГСЭ, представляющими собой ячейку капиллярной (анизометричной) формы в волокнистой (нитевидной) структуре материала;

– пенопласты со смешанным типом ГСЭ.

Следует отметить, что ячеистых пенопластов, не содержащих открытых пор, не существует, поэтому в соответствии с данной классификацией в полной мере пенопластами с замкнутыми ячейками являются синтактные пенопласты, а идеально соответствуют термину «поропласты» материалы с ретикулярной структурой. В большинстве случаев к газонаполненным пластмассам, состоящим из системы полимер – газ, обладающим смешанной структурой, и к пенопластам (пенополимерам) относятся материалы, для которых характерно преобладание закрытых (автономных) пор (ячеек), а к поропластам (порополимеры, губчатые пластмассы) – материалы, в структуре которых преобладают открытые поры (ячейки), в том числе капиллярные, сообщающиеся между собой и с окружающей средой. Довольно часто используют классификацию, согласно которой все газонаполненные пластмассы, состоящие из системы полимер – газ, называются пенопластами и подразделяются на закрытоячеистые (замкнутоячеистые), открытопористые и пенопласты со смешанной пористостью (пенопоропласты и поропенопласты).

Свойства пенопластов и поропластов определяются свойствами полимера, применяемого в качестве их основы, а также зависят от пористости, размера и формы пор, технологии получения. При этом для газонаполненных реактопластов характерны более высокие значения прочности, термостойкости и химической стойкости, а для газонаполненных термопластов – более высокая стойкость к ударным нагрузкам, более высокая производительность при производстве и возможность вторичной переработки. В то же время пенопласты отличаются от поропластов меньшими значениями водопоглощения и паропроницаемости, а также более высокими электро- и теплоизоляционными свойствами, однако для поропластов характерны более высокие звуко- и виброизоляционные характеристики, а их открытоячеистая структура позволяет использовать их в качестве пеносорбентов для нефтепродуктов.

Пенопласты и поропласты на основе реактопластов

Самым распространенным газонаполненным полимером является пенополиуре-

тан (ППУ), относящийся к реактопластам и представляющий собой продукт реакции смеси полиолов (преимущественно полиэфирных) с добавками (компонент А, в США – компонент Б) и диизоцианата или полиизоцианата (компонент Б, в США – компонент А). ППУ также может быть произведен из биополиолов, получаемых из различных видов растительного масла (в том числе отработанного): касторового, соевого, рапсового, подсолнечного и др., однако такой биогенный ППУ, для которого характерна биодegradация, мало распространен из-за высокой стоимости [3, 4]. Вспенивание полиуретана происходит за счет того, что при взаимодействии компонента Б с водой выделяется углекислый газ (химическое вспенивание), или за счет дополнительного введения в компонент А фреонов (хлорфторуглероды или хладоны: CHClF_2 , CCl_3F , CClF_3 и т.д.), пентана, бутанола или циклоалканов (преимущественно циклопентана и циклогексана), которые испаряются за счет выделения теплоты при химических реакциях (физическое вспенивание). К другим добавкам, вводимым в состав компонента А, относятся катализаторы, пенорегуляторы, стабилизаторы, красители и антипирены. В состав компонента Б могут вводиться катализаторы и активаторы. В зависимости от соотношения и строения компонентов А и Б, скорости химических реакций при получении ППУ зависят его твердость (жесткость) и степень открытости ячеек. Различают следующие основные виды ППУ:

– Эластичный (мягкий) ППУ (поролон), который отличается открытой пористостью, низкой плотностью (8–20 кг/м³), паропроницаемостью и высокими звукоизоляционными свойствами. Поролон применяется преимущественно в мебельной и автомобильной промышленности, используется в качестве упаковочного материала, для наполнения подушек, одежды и игрушек, а также находит применение при теплоизоляции труб, окон и стен.

– Полужесткий (твёрдо-мягкий, легкий, открытоячеистый) ППУ, который по своим свойствам практически аналогичен мягкому ППУ и отличается от него в основном более высокой степенью жесткости. Стоит отметить, что из-за отсутствия четких разграничений между полужестким и мягким ППУ в ряде источников все открытоячеистые ППУ относят к мягким. При вспенивании данный материал увеличивается в объеме до 100 раз. Полужесткий ППУ применяется в строительной теплоизоляции для деревянных каркасных строений при обязательной паро- и гидроизоляции,

находит применение при необходимости хорошей звукоизоляции помещения. Невысокая прочность и высокое водопоглощение не позволяют применять данный материал при наружных работах и в местах возможного контакта с водой. Данный материал также применяется при производстве мягкой мебели, для изготовления формованных изделий в автомобиле-, вагоно- и авиастроении. Существует специализированная разновидность данного ППУ с закрытоячеистой структурой, но из-за высокой стоимости она применяется только в авиа- и аэрокосмической технике.

– Жесткий (твёрдый) ППУ (PUR), характеризующийся закрытоячеистой структурой, средней плотностью (20–7500 кг/м³), приемлемой прочностью, малыми величинами паропроницаемости и водопоглощения. При вспенивании жесткий ППУ увеличивается в объеме до 30 раз. Данный материал широко применяют в строительной и технической теплоизоляции, теплоизоляции транспортных средств, а также в качестве упаковочного материала, в производстве конструктивно-декоративных изделий в строительстве, при производстве мебели, лодок и понтонов, формованных изделий в автомобиле-, вагоно- и авиастроении.

– Жидкий ППУ (монтажная пена), представляющий собой однокомпонентные и двухкомпонентные композиции, которые предназначены для нанесения методом напыления или заливки с получением полимера плотностью менее 20 кг/м³ и отличаются повышенной текучестью сырьевой композиции, что облегчает ее нанесение. Однокомпонентные композиции представляют собой форполимер (предполимер), который смешан с пенообразователем (пропеллент – смесь сжиженных газов: бутан, изобутан, пропан) и при контакте с воздухом образует ППУ смешанной структуры из закрытых и открытых ячеек. Однокомпонентные композиции используются в бытовых условиях для строительной теплоизоляции при небольших объемах работ. Двухкомпонентные композиции образуют закрытоячеистую структуру, что позволяет широко использовать их в строительной (особенно в каркасном строительстве) и технической теплоизоляции. Монтажная пена применяется в основном для монтажа и уплотнения оконных и дверных блоков, уплотнения швов и стыков, заполнения пустот.

ППУ применяется для производства изделий в форме листов (плит), блоков, рулонов из мягкого ППУ, различных формованных изделий, а полужесткий и жесткий ППУ наряду с жидким ППУ применяются для строительной и технической теплоизо-

ляции методом напыления. ППУ также применяется в производстве сэндвич-панелей, термопанелей и термобруса [5, 6]. Жесткий ППУ широко применяется для производства фасонных изделий (скорлуп и сегментов), в качестве сердечника для вакуумных теплоизоляционных панелей и для производства предизолированных труб. Преимуществами ППУ являются низкая теплопроводность ($\lambda = 0,019-0,03$ Вт/м $^{\circ}$ С для закрытоячеистых ППУ и $0,03-0,04$ Вт/м $^{\circ}$ С для открытоячеистых ППУ), долговечность (до 50 лет), широкий интервал рабочих температур (от -100 до $+150$ $^{\circ}$ С), легкость, химическая стойкость, биостойкость, звукоизоляционные свойства и низкое водопоглощение. Дополнительными преимуществами при напылении или заливке являются быстрота и легкость нанесения на поверхность любой формы, хорошая адгезия, исключение образования мостиков холода за счет сплошности покрытия и отсутствия крепежа. Недостатками применения ППУ являются низкая стойкость к ультрафиолету (необходимо окрашивать или применять облицовочно-декоративные покрытия, например, сайдинг), повышенная способность к тлению при возгорании и токсичность выделяемых при тлении веществ, средняя стоимость.

Фактически модифицированной разновидностью ППУ является пенополиизоцианурат (полиизоцианурат, ПИР, PIR), который получают в результате взаимодействия избыточного количества метилendiфенилдиизоцианата (МДИ) с полиолами на основе сложных эфиров при повышенных температурах в присутствии катализаторов. В результате такого взаимодействия избыток МДИ полимеризуется с образованием триизоцианат-изоциануратного соединения в виде жестких кольцевых молекул с прочными и устойчивыми связями. Это соединение совместно с оставшимся МДИ реагирует с полиолом и образует полиизоцианурат. Введение в композицию вспенивающих агентов позволяет получить пенополиизоцианурат с высокой жесткостью, закрытоячеистой структурой и низкой теплопроводностью ($\lambda = 0,021-0,023$ Вт/м $^{\circ}$ С), который во многом схож с жестким ППУ, но отличается более высокой прочностью и повышенной огнестойкостью. Пенополиизоцианурат выпускается в форме плит с наружными слоями из крафт-бумаги, стеклохолста, алюминиевой фольги и др. материалов (PIR-плит), скорлуп (в том числе двухслойных скорлуп совместно с ППУ) входит в состав композитных строительных материалов (сэндвич-панели, SIP-панели, термобрус [5]) и применяется в форме жид-

ких композиций для напыления и заливки. Данный пенополимер широко применяется в строительной и технической теплоизоляции, а также в теплоизоляции транспортных средств.

Широко распространенным вспененным реактопластом с открытопористой структурой является пенокарбамид (карбамидные, карбамидоформальдегидные или мочевиноформальдегидные пенопласты и поропласты, известные под торговыми названиями мипора, пеноизол и экоизол), получаемый на основе водных растворов карбамидных смол с добавлением кислот (фосфорной, соляной, щавелевой и др.) в качестве катализаторов отверждения и нефтяных сульфокислот (преимущественно алкилбензосульфокислоты АБСК) в качестве пенообразователя. Для снижения горючести в композицию вводят фосфорнокислый аммоний, для снижения хрупкости, усадки и улучшения структурообразования добавляют резорцин и синтетический латекс, для стабилизации пены применяют резорцин и фосфорную кислоту, а в качестве пластификатора применяют глицерин. Возможна модификация композиции путем добавления различных полимеров, например поливинилацеталей или фенолформальдегидных смол. Также для получения пенокарбамида широко применяют агенты вспенивающие-отверждающие (АВО-1, АВО-2), представляющие собой раствор контакта Петрова (смесь нефтяных сульфокислот), ортофосфорной кислоты и резорцина в воде и в ряде случаев дополнительно содержащие поверхностно-активные вещества (ПАВ). Получают пенокарбамид беспрессовым методом без проведения термообработки путем вспенивания смеси под действием сжатого воздуха.

Преимуществами пенокарбамида являются высокие теплоизоляционные ($\lambda = 0,023-0,047$ Вт/м $^{\circ}$ С) и звукоизоляционные свойства, термостойкость (до $95-100$ $^{\circ}$ С), биостойкость, средняя химическая стойкость, хорошая паропроницаемость, низкие значения плотности ($8-20$ кг/м 3), горючести и стоимости. Недостатками данного материала являются низкая прочность, хрупкость, высокое водопоглощение и наличие токсичного формальдегида. Пенокарбамид выпускается в насыпном виде (гранулированный пеноизол и термовата в виде хлопьев), в форме листов и блоков, которые могут быть с фольгированными поверхностями, а также в виде жидких композиций (заливочный карбамидоформальдегидный поропласт), которые на месте проведения строительных работ позволяют заполнять пенокарбамидом различные полости,

например, в составе трехслойных стен. Пенокарбамид применяется в строительной и технической теплоизоляции, а также для теплоизоляции транспортных средств.

Достаточно распространенным видом вспененных реактопластов являются пенофенопласты (пенофенолформальдегиды, фенольные или фенолформальдегидные пенопласты и поропласты), которые могут быть получены на основе новолачных фенолформальдегидных смол с добавлением органических газообразователей (порофоры, преимущественно используют динитрил азобисизомасляной кислоты ДАК), применением уротропина в качестве отвердителя и возможностью модификации бутадиен-нитрильными каучуками для снижения хрупкости или на основе резольных фенолформальдегидных смол с добавлением бикарбоната натрия или легколетучих углеводородов в качестве вспенивающих агентов в присутствии кислот (соляная, серная, фосфорная, щавелевая и т.д.), являющихся катализаторами. Пенофенопласты на основе новолачных смол получают беспрессовым методом, а на основе резольных смол – заливочным методом [7]. Большинство пенофенопластов отличаются преимущественно открытопористой структурой, но при использовании легколетучих углеводородов (например, фреонов) в качестве вспенивающих добавок производят закрытоячеистые пенофенопласты. Стоит отметить, что при увеличении плотности число открытых пор снижается до 40%.

Преимуществами пенофенопластов являются высокие звуко- и теплоизоляционные свойства ($\lambda = 0,028-0,031$ Вт/м·°С), термостойкость, химическая стойкость, низкие значения водопоглощения (для закрытоячеистых пенопластов) и горючести, низкая стоимость. К недостаткам данных материалов относятся высокая хрупкость и токсичность входящих в их состав фенола и формальдегида, которая ограничивает более широкое применение пенофенопластов. Применяются пенофенопласты в качестве тепло- и звукоизоляционных материалов в строительстве и производстве транспортных средств, для теплоизоляции трубопроводов, а также при изготовлении сэндвич-панелей. Для снижения хрупкости и улучшения других эксплуатационных свойств проводят модификацию пенофенопластов с помощью наполнителей (керамзит, вспученный сланец, вспученный перлит, пеностекло и др.), фурфурола, эпоксидных, эпоксидно-фенольных (эпоксидно-новолачных), фурановых и фурфуролацетонных смол. Наиболее распространенными модифицированными пенофенопластами

являются материалы с добавлением эпоксидно-фенольных смол (тилен, тилен-А, тилен-Б), которые отличаются повышенными значениями прочности, стойкости к различным факторам и применяются в качестве тепло-, термо-, звукоизоляционных и конструкционных материалов для оборудования и транспортных средств [8, 9].

Вспененным реактопластом, схожим по распространенности с пенофенопластом, является пеноэпоксид (пеноэпокси-пласт, эпоксидные пенопласты и поропласты), получаемый на основе эпоксидных и эпоксидно-новолачных смол с добавлением легколетучих углеводородов в качестве вспенивающих агентов, ди- и полиаминов в качестве отвердителей. Для повышения теплостойкости пеноэпоксидов в качестве отвердителей используют ароматические полиамины (фенилендиамин, диаминодифенилметан и др.), а в качестве газообразователей – карбаматы полиаминов, азосоединения, гидразиды, боргидриды и др. Существуют разработки по использованию полиаминоалкилфенолов в качестве полифункциональной добавки, являющейся одновременно отвердителем и вспенивающим агентом [10]. Для снижения плотности пеноэпоксидов в качестве отвердителей используют комплексы фторида бора со спиртами, эфирами или аминами, а в качестве вспенивающего агента – фреоны. При добавлении ПАВ вспенивание пеноэпоксидов происходит при комнатной температуре, отверждение занимает несколько минут, а у получаемых пеноэпоксидов повышаются упругость и светостойкость. Применение вспенивания фреонами позволяет получить меньшую теплопроводность, а отвердители аминного типа повышают химическую стойкость пеноэпоксидов. Большинство пеноэпоксидов являются жесткими материалами с закрытоячеистой структурой, однако на основе олигомеров, представляющих собой продукты взаимодействия бисфенола с эпигалогенгидридами, при использовании многоатомных спиртов в качестве отвердителей, хлор- и фторалканов в качестве вспенивающих агентов с добавлением катализаторов Фриделя – Крафтса и ПАВ могут быть получены эластичные пеноэпоксиды с открытопористой структурой [11].

Преимуществами пеноэпоксидов являются механическая прочность (сравнимы с жесткими ППУ), малая плотность (не более 100 кг/м³), высокие тепло- и звукоизоляционные свойства, высокие диэлектрические характеристики, термостойкость и широкий интервал рабочих температур (от -50 до +150 °С), химическая стойкость, низкое водопоглощение (за исключением

открытопористых пеноэпоксидов) и высокая адгезия. Недостатками пеноэпоксидов являются горючесть, уменьшение прочности и жесткости с повышением температуры, сравнительно высокая стоимость. Пеноэпоксиды на основе эпоксидно-фенольных смол отличаются повышенными эксплуатационными характеристиками. Пеноэпоксиды применяются в качестве тепло- и звукоизоляционного материала в строительстве (сэндвич-панели и теплоизоляционные плиты для кровли) и машиностроении (преимущественно для холодильных установок), для теплоизоляции труб (производство скорлуп), в качестве электроизоляционного материала в радиотехнике, в производстве конструкционных изделий в авиационной, автомобильной, судостроительной и приборостроительной промышленности.

В последнее время получают распространение закрытоячеистые вспененные реактопласты из группы пенополиимидов на основе полиимидных смол, которые представляют собой растворы полиамидокислот в алифатических амидах (преимущественно в диметилформамиде и диметилацетамиде) или диметилсульфоксиде. При производстве пенополиимидов обычно на первой стадии синтезируют полиамидокислоту в результате взаимодействия ангидридов и диангидридов тетракарбоновых кислот со смесью ароматических диаминов или диизоцианатов, а на второй стадии проводят имидизацию (преобразование амидокислоты в имидные циклы) и вспенивание под действием температуры или в результате обработки полиимидной смолы смесью ангидрида карбоновой кислоты и третичного амина.

К пенополиимидам также относятся пенополиакрилимиды и пенополиметакрилимиды (ПМИ-пенопласты), последние из которых в настоящее время наиболее распространены в данной группе пенополимеров. Пенополи(мет)акрилимиды получают на основе сополимеров метакриловой кислоты и (мет)акрилонитрила, акриловой кислоты или (мет)акриламида, содержащих нитрильные, амидные и кислотные звенья в различном соотношении с добавлением пенообразователей (карбамид, диметилкарбамид, спирты), антипиренов (полифосфат аммония, фосфоорганические и галогенированные углеводороды) и пластификаторов (фталаты, эфиры кислот и спиртов, низкомолекулярные полиэфиры) [12]. Кроме пенообразователей вспениванию композиции способствуют выделение аммиака (или метиламина) и CO_2 при термоллизе поли(мет)акриламида или конденсация сополиме-

ров с (мет)акриловой кислотой с выделением воды. В качестве пенообразователей возможно использование третбутил(мет)акрилата и третбутилового спирта, из третбутильных групп которых при термоллизе образуется вспенивающий газ (изобутилен), способствующий образованию значительно меньших по размеру пор по сравнению с другими пенообразователями. Для повышения прочности в состав композиции могут вводиться акрилаты с 2–3 винильными группами, а также метилольными фрагментами в качестве сшивающих сомономеров или различные наполнители, преимущественно волокнистые. Прочность пенопласта также повышается с увеличением времени термоллиза. Для лучшей растворимости и более полного разложения на аммиак (или метиламин) и CO_2 при термоллизе в смесь добавляют небольшое количество воды [12].

Пенополиимиды и пенополи(мет)акрилимиды производят беспрессовым методом и в зависимости от применяемых для их получения компонентов и соотношения между ними получают жесткие и мягкие (эластичные) пенополимеры. Данные материалы отличаются высокой прочностью, широким диапазоном рабочих температур (от -196 до $+350$ °C), низкой горючестью, химической стойкостью, биостойкостью, устойчивостью к ультрафиолетовым лучам, высокими диэлектрическими характеристиками, низкими значениями газопроницаемости и водопоглощения [13–15]. Основным недостатком данной группы пенопластов является высокая стоимость. Пенополиимиды и пенополи(мет)акрилимиды выпускают в форме листов или используют в качестве среднего слоя в составе сэндвич-панелей. Жесткие разновидности данных материалов применяют для изделий конструкционного и радиотехнического назначения, а эластичные – для теплоизоляционных изделий в судостроении, вагоностроении, приборостроении, электронике, авиакосмической и атомной промышленности [13–15].

*Пенопласты и поропласты
на основе термопластов*

Вторым по распространенности пенополимером после ППУ и первым по распространенности среди вспененных термопластов является пенополистирол (ППС), который является закрытоячеистым материалом и производится из полистирола или его производных (полидихлорстирол, полимонохлорстирол). В зависимости от способа получения различают:

– Беспрессовый ППС (вспененный ППС, стиропор или EXP – Expanded PolyStyrene),

получаемый путем предвспенивания гранул из суспензионного полистирола за счет испарения содержащихся в них жидких вспенивающих добавок (дихлорметана, пентана, изопентана) при обработке водяным паром с последующим окончательным вспениванием и спеканием гранул в блок-формах. Разновидностью данного материала является неопор, отличающийся от стиропора наличием микрочастиц графита, которые отражают инфракрасное и ультрафиолетовое излучения, тем самым повышая теплоизоляционные свойства ППС [16, 17]. По сути, еще одной разновидностью данного материала является автоклавный ППС, для получения которого спекание гранул полистирола проводится в автоклаве.

– Прессовый ППС, получаемый при смешивании полистирола с твердыми газообразователями (порофоры: ДАК, карбонат аммония), последующими горячим прессованием, при котором порофоры разлагаются с равномерным распределением газа по заготовке и вспениванием заготовки в обогреваемой камере. В настоящее время прессовый ППС практически не используется, так как по сравнению со стиропором стоимость его производства выше, а свойства практически аналогичны, хотя у прессового ППС несколько выше плотность и прочность.

– Экструдированный (экструзионный) ППС (XPS – eXtruded PolyStyrene, известен под торговыми названиями пеноплекс, техноплекс), получаемый из гранул суспензионного полистирола с добавлением газообразующих добавок (фреоны или бесфреоновые системы на основе CO_2), которые при плавлении гранул в экструдере разлагаются с образованием газов, и имеющий в результате экструзии монолитную мелкопористую структуру. Разновидностью данного материала является автоклавно-экструзионный ППС, для получения которого проводится обработка экструдата в автоклаве.

К преимуществам ППС относятся легкость, низкие значения теплопроводности ($\lambda = 0,029\text{--}0,038$ Вт/м \cdot °С) и водопоглощения, хорошие звукоизоляционные свойства, низкая стоимость, а изделия из ППС можно применять при температурах от -180 до $+80$ °С. К недостаткам ППС относятся низкая стойкость к ультрафиолету и растворителям, горючесть и токсичность продуктов горения, способность с течением времени выделять токсичный стирол, склонность к окислению на воздухе, низкая паропроницаемость и сравнительно невысокая прочность. Если сравнивать стиропор и экструдированный ППС, то последний

отличается более высокой прочностью при более низком водопоглощении, теплопроводность этих материалов практически одинакова, а стоимость стиропора ниже. ППС выпускается в виде гранул (стиропор, неопор), листов (плит, в том числе с фольгированной поверхностью для отражения теплового излучения, с рельефной поверхностью и со специальными креплениями для монтажа), блоков, фасонных (скорлуп) и формованных изделий, используется в качестве сердечника для вакуумных теплоизоляционных панелей и применяется в производстве композитных строительных изделий: сэндвич-панелей, термопанелей, SIP-панелей и термобруса. Изделия из ППС широко используются для строительной и технической теплоизоляции, в качестве несъемной опалубки и при теплоизоляции транспортных средств. ППС также используется в качестве звукоизоляционного, амортизационного и упаковочного материала, в производстве плавучих средств, литьевых форм, лотков для пищевых продуктов. Гранулы и дробленая крошка ППС применяются в качестве наполнителя для бетонов, бескаркасной мебели и игрушек, в качестве транспортировочного материала для хрупких грузов, для насыпной тепло- и звукоизоляции [18].

Широко распространенным на сегодняшний день газонаполненным полимером является пенополиэтилен (ППЭ), для получения которого используют в основном полиэтилен высокого давления (ПЭВД, ПВД), но ППЭ может быть получен и из полиэтилена низкого давления (ПЭНД, ПНД). ППЭ может быть как закрытопористым, получаемым в результате введения в полимерный расплав газов (бутан, изобутан, пропан или фреон), так и открытопористым, получаемым в результате вымывания нагретой водой или кислотой растворимого наполнителя (хлористый натрий, крахмал и др. [19]). В зависимости от молекулярной структуры различают:

– Несшитый ППЭ (НПЭ), который характеризуется линейной структурой и крупными порами, отличается хорошими теплоизоляционными свойствами ($\lambda = 0,045\text{--}0,055$ Вт/м \cdot °С), но легко деформируется и после снятия нагрузки практически не восстанавливает форму. Редко применяется в строительстве и в основном используется в качестве упаковочного материала.

– Сшитый ППЭ, который получают химическим методом (ХППЭ) за счет введения в расплав перекиси водорода или физическим методом (ФППЭ) за счет воздействия пучка электронов на расплав. Сшитый ППЭ

отличается сетчатой структурой с дополнительными боковыми связями, малым размером пор, высокими теплоизоляционными свойствами ($\lambda = 0,031-0,039$ Вт/м $^{\circ}$ С), более высокими значениями плотности и прочности. При этом ФППЭ отличается более высокой прочностью и отличается эластичностью, но его стоимость также выше.

К преимуществам ППЭ относятся химическая стойкость, биостойкость, высокие диэлектрические и звукоизоляционные свойства, низкое водопоглощение (для закрытопористого ППЭ), хорошие упругость и эластичность (за исключением НПЭ), низкая токсичность продуктов горения. Интервал рабочих температур данного материала находится в диапазоне от -60 до $+100$ $^{\circ}$ С. К недостаткам ППЭ относятся горючесть, легкость воспламенения и низкая стойкость к ультрафиолетовому излучению. Изделия из ППЭ выпускаются в виде рулонов, фасонных изделий (цилиндров с разрезом и без него), компенсационных матов и жгутов. Рулонный сшитый ППЭ в большинстве случаев выпускается с дополнительным покрытием с одной или двух сторон из фольги, металлизированной пленки или металлизированных волокон из лавсана (применяется для технической теплоизоляции), а также с покрытиями из ламинированной или мелованной бумаги или картона (применяется для строительной теплоизоляции). Среди фольгированных видов ППЭ широко известны торговые названия пенолон (также бывает с подложкой из ламинированной бумаги), пенофол (пенофольга), термофол, тепфол, а также мерилон (утеплитель для труб), который может быть фольгированным и нет. ППЭ применяется в строительной и технической теплоизоляции, для теплоизоляции транспортных средств, в качестве гидро- и звукоизоляционного, упаковочного, уплотнительного, прокладочного и амортизационного материалов, а также находит применение в ортопедии.

Относительно распространенным на сегодняшний день газонаполненным полимером является пенополивинилхлорид (ППВХ), который получают из поливинилхлорида (ПВХ) с использованием азобисизобутиронитрила (ДАК или ЧХ3-57), углекислого аммония, бикарбоната натрия или легколетучих жидкостей (например, фреонов) в качестве газообразователей. В связи с низкой температурой деструкции ПВХ, близкой к температуре размягчения полимера, в состав композиций вводятся пластификаторы (диоктилфталат, дибутилфталат или трикрезилфосфат), а из-за низкой эластической деформации при высоких температурах (низкой текучести) – мономером,

являющиеся временными пластификаторами (преимущественно метилметакрилат). С повышением количества мономера относительно количества пластификатора повышается жесткость получаемого пенопласта, а с повышением количества пластификатора относительно количества мономера увеличивается эластичность ППВХ. Таким образом, из непластифицированного ПВХ получают жесткий (твердый) ППВХ, а из пластифицированного – эластичный (мягкий) и полужесткий. В качестве частичной замены пластификаторов для повышения эластичности в ряде случаев используют бутадиен-нитрильные каучуки. Плотность ППВХ повышается с увеличением молекулярной массы ПВХ. Для формирования сетчатой структуры с получением сшитого ППВХ (пеноизовинил) в состав композиции вводят толуилендиизоцианат и малеиновый ангидрид. ППВХ по аналогии с ППС получают беспрессовым, прессовым и экструзионным методами, последний из которых наиболее распространен. При двухстадийных способах прессования и экструзии, которые заключаются во вспенивании сформованных заготовок при повторном нагреве, в отличие от одностадийных способов получают открытопористый ППВХ, называемый винипором.

Преимуществами ППВХ являются легкость, средняя прочность, химическая стойкость, атмосферостойкость, водостойкость, низкое водопоглощение, хорошие звуко- и электроизоляционные свойства, низкая теплопроводность ($\lambda = 0,035-0,058$ Вт/м $^{\circ}$ С), низкая горючесть и способность к самозатуханию. К недостаткам данного материала относятся узкий интервал рабочих температур (от -60 до $+60$ $^{\circ}$ С), выделение хлороводорода при горении и возможность выделения хлороводорода при частичном разложении, приводящая к коррозии металлических поверхностей. Изделия из жесткого ППВХ выпускают в форме плит, скорлуп и сегментов, а из эластичного ППВХ – в форме листов и рулонов. ППВХ применяется в строительной и технической теплоизоляции, для теплоизоляции транспортных средств, для звукоизоляции, при производстве плавучих средств, а эластичные разновидности также используются в качестве уплотняющих и амортизационных материалов. Стоит отметить, что существуют разновидности микропористого ППВХ, которые получают путем спекания ПВХ (мипласт), вымывания содового наполнителя (пластипор), либо готовят из смеси ПВХ, крахмала и циклогексанона (поровинил) с последовательными вымыванием циклогексанона, набуханием крахмала в горячей воде, об-

работкой крахмала в щелочи и гидролизом крахмала в воде. Эти разновидности ППВХ применяют для изготовления сепараторов для автомобильных аккумуляторов [20].

Распространенным на сегодняшний день вспененным полимером является пенополипропилен (ППП, пористый полипропилен, пенопропилен), получаемый в результате высокотемпературной (около 240 °С) обработки полипропилена с добавлением вспенивающей добавки (толуолсульфонилсемикарбазид) с получением отдельных мелкодисперсных шарообразных гранул, спекания гранул под действием горячего пара при высоком давлении с образованием закрытоячеистой структуры и дальнейшей экструзии через устройства целевого типа. Особенностью технологии получения ППП является набор прочности и твердости материала в течение около 2 дней после производства. Изделия из ППП выпускаются в виде листов и рулонов, которые в большинстве случаев производят с покрытиями из фольги, металлизированных волокон или пленки из лавсана (композитные ЕРР, в том числе фольгированный ППП с торговым названием пенотерм) или обычного полипропилена (облегченный полипропилен). Преимуществами ППП являются высокие теплоизоляционные свойства ($\lambda = 0,0344 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$), низкая плотность (40 кг/м³), малое водопоглощение, средняя прочность, упругость, высокие паро-, звуко-, вибро- и электроизоляционные характеристики, биостойкость, химическая стойкость, широкий интервал рабочих температур (от -40 до +150 °С), низкая тепловая усадка, стабильность свойств в течение эксплуатации и низкая токсичность продуктов горения. Недостатками ППП являются хрупкость при низких температурах и горючесть. Изделия из ППП применяются в строительной гидро- и теплоизоляции, в том числе в помещениях с повышенной влажностью, в технической теплоизоляции и при теплоизоляции транспортных средств. ППП может входить в состав сэндвич-панелей, а также применяется в качестве звукоизоляционного, упаковочного, уплотнительного, прокладочного и амортизационного материалов.

Особые разновидности пенопластов

Особую группу газонаполненных пластмасс составляют интегральные пенопласты, которые также называют структурными, структурированными, поверхностно-уплотненными, подвспененными и частично вспененными. Интегральные пенопласты представляют собой материалы с анизотропной структурой, состоящей из пористого

внутреннего слоя (сердцевины), постепенно переходящей в монолитный поверхностный слой (корку). Различают однокомпонентные (сердцевина и наружный слой выполнены из одного полимера) и многокомпонентные (сердцевина и наружный слой выполнены из двух или трех разных полимеров) интегральные пенопласты, которые получают преимущественно на основе полиуретанов, а также на основе полистирола, акрилонитрилбутадиенстирола (АБС-пластика), полиэтилена, поливинилхлорида, поликарбоната, полисульфона, полиформальдегида и др. полимеров и сополимеров. Интегральные пенопласты отличаются повышенными жесткостью и прочностью, низким водопоглощением и применяются в производстве корпусной мебели, строительных изделий (панелей, оконных и дверных рам, кровельных балок и пр.), в автомобилестроении, авиации, электротехнике, обувной промышленности и пр. Существуют исследования по возможности применения интегральных пенополиуретанов в теплоизоляции трубопроводов [21].

Особыми разновидностями пенопластов являются смешанные пенопласты, представляющие собой материалы на основе нескольких полимеров, и многослойные пенопласты (пеноламинаты), состоящие из нескольких слоев, которые выполнены из разных пенопластов и соединены путем склеивания, сплавления, сварки и др. методов. Также существуют армированные и наполненные разновидности газонаполненных пеноматериалов [22, 23].

Синтактные пенопласты (сферопластики) получают при добавлении в полимерное связующее (эпоксидные и полиэфирные смолы, полиуретаны, кремнийорганические и др. связующие) полых сферических наполнителей (микросфер диаметром 10–2000 мкм или резе макросфер диаметром 5–40 мм) с последующим отверждением. Наиболее широко применяют стеклянные (стеклосферы, эккосферы), алюмосиликатные (ценосферы, зольные микросферы, микросферы энергетических зол – стеклокристаллические микросферы, образующиеся при высокотемпературном сжигании угля), фенолформальдегидные микросферы и макросферы. Менее распространены углеродные микросферы и макросферы, получаемые путем пиролиза коксового числа, а также полые сферические наполнители из керамики, диоксида кремния, диоксида циркония, эпоксидной смолы, хитозана, полистирола, акрилатов и др. материалов. По сути, к синтактным пенопластам также может быть отнесен поропе-

нопласт, получаемый при наполнении полиэфирных смол гранулами пеностекла. Для повышения водостойкости сферопластиков применяют нанесение на поверхность наполнителя слоя силанов (аппретирование микросфер).

Преимущества и недостатки синтактных пенопластов определяются видами связующего и сферического наполнителя, соотношением между ними, размером частиц наполнителя и толщиной его стенок. Сферопластики отличаются средними теплоизоляционными свойствами ($\lambda = 0,042-0,1$ Вт/м²·°С), жесткостью, прочностью и низким водопоглощением, а их основными недостатками являются сравнительно высокая плотность (200–800 кг/м³) и хрупкость. Синтактные пенопласты применяются как конструкционные и теплоизоляционные материалы для сотовых и многослойных конструкций в строительстве, судо- и автомобилестроении, авиации и космической технике, а также для теплоизоляции трубопроводов, в производстве плавучих средств и мебели [1, 24, 25].

Сотопласты представляют собой каркасные конструкции из упорядоченно чередующихся ячеек определенной формы (шестигранник, квадрат, прямоугольник и др.), открытых с обоих торцов. Каркас сотопласта изготавливают из крафт-бумаги, хлопчатобумажной ткани, алюминиевой фольги, стеклоткани, арамидной бумаги, полимерных пленок и др. материалов. Каркас сотопласта получают склеиванием или химической сваркой из отдельных гофрированных элементов, путем растяжки пакета из рулонной заготовки, слою которой склеивают по клеевым полосам, или методом объемного ткачества. В результате любого из этих способов получают сотоблок, который нарезают на заготовки требуемой ширины. Материал каркаса для повышения жесткости пропитывают фенолформальдегидными (сотифенопласт), эпоксидными или карбамидными смолами. Возможна сборка сотопласта из непропитанных элементов, но в таком случае пропитывают связующим уже сотопластовую конструкцию. В пропиточный состав иногда включают антипирены, а ячейки сотопласта для повышения тепло- и звукоизоляционных свойств могут быть заполнены сыпучим пенокарбамидом [26], силипором (сотосилипором) [27], а также пенопластами путем заливки или вспенивания композиции непосредственно в ячейках [28].

Свойства сотопластов во многом определяются материалом каркаса, размером и формой ячеек. Сотопласты характеризуются высокими теплоизоляционными

свойствами, которые при низких температурах зависят от материала каркаса, а при высоких – от конвекции в ячейках. В целом для сотопластов характерна высокая прочность при приложении нагрузки перпендикулярно открытым торцам ячеек и хорошие звукоизоляционные свойства. К общим недостаткам сотопластов относятся высокое водопоглощение и малая прочность. Сотопласты применяют в составе отделочных, конструкционных, звуко- и теплоизоляционных сэндвич-панелей для использования в строительстве, авиа- и судостроении, изготовлении космических кораблей и криогенной техники. В строительстве сотопласты также используют для получения облегченных трехслойных ограждающих конструкций и дверей.

Пеноэластомеры

К пеноэластомерам относятся эластичные пенопласты и поропласты, рассмотренные выше, а также пористые резины (пенорезины). В первую очередь к пенорезинам относятся материалы на основе натуральных и синтетических (натрий-бутадиеновый, стирольный, хлоропреновый, этилен-пропиленовый каучуки и их комбинации с нитрильным и изопреновым) каучуков, для получения которых в состав композиции наряду с наполнителями, пластификаторами и вулканизирующими добавками вводят газообразующие добавки, способные разлагаться при температурах, близких к температурам вулканизации. При использовании органических газообразователей и вулканизации при высоком давлении получают ячеистые резины с замкнутыми порами, а при использовании неорганических газообразователей (например, бикарбонат натрия) и вулканизации при обычном давлении образуются пористые (губчатые) резины с сообщающимися порами. Для получения пенорезин из водных эмульсий частиц каучука (латексы) газообразователи не применяют, а получают вспененную структуру за счет механического перемешивания с последующими желатинизацией и вулканизацией пены. Пенорезины на основе каучуков отличаются малым размером пор (0,2–0,4 мм, существуют микропористые резины с размером ячеек около 0,4 мкм), средней плотностью (60–800 кг/м³), высокой эластичностью, высокими электро-, вибро-, звуко- и теплоизоляционными ($\lambda = 0,035-0,045$ Вт/м²·°С) свойствами. Недостатками пенорезин являются способность к выкрошиванию и усадка со временем. Пенорезины изготавливают в виде листов, рулонов (в том числе самоклеящихся со слоем фольги или с пле-

ночными покрытиями), профилей, лент, цилиндров и применяют в качестве уплотнителей, герметизирующих прокладок, шумо-, вибро- и электроизоляции, теплоизоляции трубопроводов, теплоизоляционных слоев в составе напольных покрытий, подошвенных материалов, для изготовления сидений и матрацев. К особым разновидностям пористых резин относятся:

– пеноэбонит, получаемый из резиновых смесей с использованием большого количества серы в качестве вулканизирующей добавки и отличающийся высоковулканизированной структурой, высокой химической стойкостью, диэлектрическими свойствами, прочностью и жесткостью до температур 60–120 °С (при более высоких температурах пеноэбонит становится эластичным и подвергается деформации с сохранением формы после снятия нагрузки);

– оназот, получаемый из мягких резиновых и эбонитовых смесей путем вспенивания подаваемым под давлением азотом с частичной вулканизацией в автоклавах с последующими снятием давления (при этом растворенный азот вспенивает смесь) и вулканизацией под давлением на прессах. Оназот отличается высокой водостойкостью и низкой гигроскопичностью.

Пеноэбонит и оназот применяют в качестве тепло- и звукоизоляционных, амортизационных материалов в транспортных средствах и строительстве. Оназот применяется для теплоизоляции холодильных установок и трубопроводов.

К пенорезинам также относятся эластичные (упругоэластичные) пеноорганосилоксаны (пенополиорганосилоксаны, пеносилоксаны, пеносиликоны) с закрытой структурой, которые получают на основе кремнийорганических (силиконовых) каучуков, преимущественно сополимеров диметилсиландиола с метилвинил(или фенил)силандиолом, с применением в качестве газообразователей органических порофоров (ДАК, карбонат аммония, бикарбонат натрия и др.) или полиалкилгидросилоксанов (например, полиэтил- или полиметилгидросилоксаны), которые выделяют водород при взаимодействии с amino- и гидроксилсодержащими соединениями [29]. Вспенивание силиконовых каучуков также проводят путем подачи азота под давлением. В состав смесей дополнительно вводят ускорители и катализаторы (четвертичные аммонийные соли силанолов, соли и гидроксиды щелочных металлов, амины, олигоамиды и т.д.), а для повышения прочности добавляют наполнители (стеклянные и асбестовые волокна, молотый асбест, кварц и др.), а также получают пенорезины

из смесей силиконовых каучуков с эпоксидными и фенолоформальдегидными смолами или полиуретанами. Вулканизирующими агентами в составе силиконовых резиновых смесей являются пероксиды. Кроме эластичных пеносилоконов существуют следующие разновидности [29]:

– жесткие пенополиорганосилоксаны, получаемые на основе сополимеров метилфенилсиландиола и фенил(или метил)силантриола и отличающиеся высокой прочностью;

– пеногерметики, получаемые на основе полиметил- или полиметилфенилсилоксановых каучуков с добавлением упрочняющих наполнителей, водород- и гидроксилсодержащих компонентов, оловоорганического катализатора. Для получения пеногерметика компоненты перемешивают, заливают и шприцуют в герметизируемый объем. После индукционного периода одновременно происходят вспенивание и вулканизация смеси.

Преимуществами пеносилоконов являются эластичность (кроме жестких пеносилоконов) и сохранение свойств в широком температурном интервале (от -100 до +250 °С), химическая стойкость, высокие электроизоляционные свойства и низкая горючесть. К недостаткам пеносилоконов относятся тепловое старение при отсутствии воздуха или в среде перегретой воды или пара, а также высокая стоимость. Пеносиликоны применяются в качестве тепло- и электроизоляционных материалов в конструкциях, работающих при высоких температурах, а также в качестве уплотняющих, амортизирующих и звукоизоляционных материалов, для создания огнезащитных перегородок и в технической теплоизоляции.

К пеноэластомерам также относятся эластичные термопластичные пенополиуретаны (ТППУ, TPU, пенотермополиуретаны), которые представляют собой линейные блок-сополимеры из чередующихся мягких (эластичных, низкополярных, полиэфирных или полиэстеровых) сегментов, образующихся в результате реакции между длинноцепочечным диолом (полиолом) и диизоцианатом, и жестких (твердых, высокополярных, ароматических или алифатических) сегментов, образующихся в результате реакции между короткоцепочечным диолом (удлинитель цепи) и диизоцианатом. Сегменты связаны между собой ковалентными связями, а роль поперечных связей (так называемые «псевдосшивки») между молекулами выполняют силы притяжения между высокополярными сегментами соседних молекул, образующие так называемые кристаллические (псевдокристалли-

ческие) области внутри эластичной матрицы полимера. При нагреве «псевдосшивки» исчезают, что и создает термопластичность данного материала. Жесткие сегменты придают ТППУ прочность, а мягкие – эластичность, поэтому варьируя соотношение компонентов, образующих эти сегменты, можно изменять свойства материала, получая его высокоэластичные и жесткие разновидности. На жесткость и эластичность ТППУ также влияет выбор диизоцианата, например применение МДИ способствует образованию жестких сегментов.

По своим свойствам ТППУ во многом аналогичен ППУ. Разновидностью данного материала является вязкоэластичный ППУ, обладающий эффектом памяти, что позволяет ему принимать форму воздействующего на него предмета и очень медленно восстанавливать форму после снятия нагрузки. К преимуществам ТППУ относятся сочетание высоких значений прочности, эластичности и абразивной стойкости, стойкость к ультрафиолету (за счет алифатических сегментов), низкая горючесть, химическая стойкость, атмосферостойкость и низкотемпературная ударная вязкость. Основным недостатком ТППУ является высокая цена. ТППУ применяется для изготовления звуко-, виброизоляционных и уплотнительных материалов в машиностроении, обивочных (для тепло- и звукоизоляции) материалов в автомобилестроении, в производстве подошвенных материалов, сидений, матрацев и подушек.

Прочие газонаполненные полимерные материалы и изделия

К газонаполненным пластмассам с капиллярными ГСЭ относятся нетканые утеплители из полиэфирных волокон, которые объединяют под общим названием синтепон и выпускают как из первичного, так и из вторичного полимерного сырья. Для получения полиэфирных волокон используется преимущественно полиэтилентерефталат (ПЭТ, ПЭТФ, полиэстер, лавсан). К разновидностям полиэфирного утеплителя относятся шерстепон (шерстин), получаемый из смеси натуральных шерстяных и синтетических полиэфирных волокон, синтепух, выпускаемый из полиэфирных волокон методом вычесывания, холлофайбер (в строительстве также известны поллитерм и политекс), получаемый из полых полиэфирных волокон, синтепласт, получаемый из полиэфирных и силиконовых волокон, а также шелтер и тинсулейт, получаемые из тонких полиэфирных волокон. Синтепух, холлофайбер, шелтер и тинсулейт в большинстве случаев производят

с силиконизированной поверхностью для гидрофобизации волокон, повышения их прочности и эластичности. Разновидности синтепона получают термоскреплением (материалы, полученные данным методом, называют евро синтепон), при котором волокна во время нагрева скрепляются между собой за счет плавления их наружных слоев, иглопробивным методом (материалы, полученные данным методом, называют синтоватин, синтеватин, синтетический ватин), при котором полотно пробивается специальными иглами и волокна спутываются за счет их движения, и клеевым (эмульсионным) методом. Синтепон из вторичного сырья и синтепон, получаемый клеевым способом, отличаются более низким качеством. К преимуществам полиэфирных утеплителей относятся высокие теплоизоляционные свойства ($\lambda = 0,029-0,039$ Вт/м °С), легкость, упругость, эластичность и биостойкость. У разновидностей синтепона прочность, паропроницаемость, водопоглощение, долговечность и стоимость в зависимости от состава и технологии производства могут изменяться от низких значений до высоких, а к общим недостаткам относятся горючесть и сложность монтажа на вертикальные поверхности. Синтепон применяется как наполнитель для одежды, обуви (дутиков), спальных принадлежностей, игрушек, в качестве фильтрующего материала, а также применяется в форме матов и рулонных материалов для теплоизоляции труб, в строительной теплоизоляции (преимущественно для утепления крыш и потолков) и звукоизоляции.

К газонаполненным пластмассам с капиллярными ГСЭ также относится группа материалов, объединяемых под названием геотекстиль. Эти материалы, относящиеся к геосинтетическим, представляют собой тканые (геоткань) и нетканые полотна из одной непрерывной (бесконечной) нити (мононити) или коротких (штапельных) волокон на основе полипропиленовых и полиэфирных (реже полиэтиленовых, полиамидных) волокон или их смесей. Для производства геотекстиля используют как первичное, так и вторичное сырье, а в состав смесей также включают отходы текстильной (вискоза, хлопок, шерсть) и бумажной (целлюлоза) промышленности. В ряде случаев для повышения прочности в состав геотекстиля вводят стекловолокно, а для модификации его характеристик проводят пропитку полимерными смолами или латексом. Нетканый геотекстиль получают из ориентированных или неориентированных (хаотично расположенных) волокон иглопробивным методом (наиболее известен иглопробивной гео-

текстиль из полипропилена под торговым названием дорнит), термоскреплением, гидроскреплением (спутывание волокон происходит под действием тонкоструйного потока воды с высоким напором), а также при помощи термофиксации иглопробивного полотна горячим воздухом. Также существуют технологии по получению вязаных (плетеных) полотен (геотрикотажа) путем петлевого переплетения волокон, однако такое полотно отличается низкой прочностью на разрыв, что ограничивает его использование по сравнению с ткаными и неткаными полотнами. К преимуществам геотекстиля относятся низкая теплопроводность, хорошие звукоизоляционные свойства, эластичность, прочность на разрыв, химическая стойкость, биостойкость, устойчивость к ультрафиолету и факторам окружающей среды, легкость монтажа, долговечность, возможность пропускать, но не впитывать воду, а также сравнительно невысокая стоимость. При этом полипропиленовое волокно в составе геотекстиля отличается более высокой прочностью, химической стойкостью и устойчивостью к перепадам температур, но под воздействием ультрафиолета становится хрупким, применение вторичного сырья снижает характеристики материала, а использование отходов текстильной и бумажной промышленности понижает биостойкость, стойкость к факторам окружающей среды и долговечность. Геотекстиль выпускается в виде рулонов и применяется для создания армирующих, несущих, защитных, разделительных, фильтрующих и дренажных слоев в техническом и дорожном строительстве, в ландшафтном дизайне, при строительстве гидротехнических сооружений (мосты, дамбы, каналы и т.д.), гидроизоляции фундаментов, в качестве укрывного мульчирующего материала в сельском хозяйстве, а также используется для строительной тепло- и звукоизоляции, для прокладки коммуникаций, в производстве мягкой мебели, фильтров, одежды, обуви, линолеумов и ковровых изделий.

К нетканым материалам на основе полипропиленовых или полиэфирных волокон также относится синтетический (искусственный) войлок, получаемый иглопробивным методом или термоскреплением. По своим свойствам этот материал практически аналогичен нетканому геотекстилю и по сути отличается от него тем, что применяется как прокладочный, тепло- и звукоизоляционный материал в машиностроении, нефтехимическом и сталелитейном производствах, в строительстве, в производстве мебели и матрацев. Разновидностью синтетического войлока является

термовойлок (термопрессованный войлок), который получают из смеси акриловых или полипропиленовых волокон с натуральным волокном (шерсть, лен, джут) и применяют преимущественно в производстве мягкой мебели и матрацев.

По своей сути к газонаполненным пластмассам с ячеистыми ГСЭ могут быть отнесены воздушно-пузырчатые пленки (ВПП, воздушно-пузырьковые, пузырьковые пленки), изготавливаемые из первичного или вторичного ПЭНД и представляющие собой многослойные конструкции, в которых один или несколько слоев пленки имеют выступы, формирующие воздушные камеры (пузырьки). Этот слой или слои с одной или двух сторон закрыты одним или несколькими (до четырех) слоями пленки. Однослойные и двухслойные ВПП могут иметь покрытие из металлизированного полипропилена, крафт-картона или фольги или комбинированы с ППЭ. Преимуществами ВПП являются высокие амортизирующие, гидро- и теплоизоляционные ($\lambda = 0,031$ Вт/м²·°С) показатели, светостойкость (при наличии светостабилизаторов), легкость, биостойкость, химическая стойкость, прочность, эластичность и низкая цена. К недостаткам ВПП можно отнести паронепроницаемость (преимущество для парниковых разновидностей), возможность механического повреждения целостности пузырьков и горючесть. ВПП применяются в качестве упаковочного материала, покрытия теплиц и бассейнов. Металлизированные и фольгированные (мультифольга) разновидности применяются для теплоизоляции трубопроводов, как гидро-, звуко- и теплоизоляционный материал в строительстве.

Заключение

Как следует из представленной в данной работе информации, газонаполненные полимерные материалы и изделия отличаются большим разнообразием свойств и форм применения, что позволяет эффективно использовать их во многих областях человеческой деятельности. Общими преимуществами данных материалов являются легкость, высокие тепло- и звукоизоляционные свойства, хорошие значения химической стойкости и биостойкости. К общим недостаткам рассматриваемых материалов относятся средняя термостойкость, горючесть, явление старения полимеров под действием факторов окружающей среды (ультрафиолет, температура, кислород, вода и т.д.), определенная токсичность продуктов горения и разложения. Преимущества газонаполненных полимеров могут быть усилены, а недостатки уменьшены за счет моди-

фикации полимеров, на основе которых они получают. С учетом преимуществ и недостатков, приемлемой стоимости и высокой производительности процессов получения данных материалов они остаются востребованными, а их свойства, составы и технологии получения постоянно развиваются и совершенствуются.

Список литературы

1. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5. С. 245–256.
2. Сокольская М.К., Колосова А.С., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Связующие для получения современных полимерных композиционных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. № 10–2. С. 290–295.
3. Kurańska M., Polaczek K., Auguścik-Królikowska M., Prociak A., Ryszkowska J. Open-cell rigid polyurethane biofoams based on modified used cooking oil. *Polymer*. 2020. Vol. 190. Article 122164.
4. Kattiyaboot T., Thongpin C. Effect of Natural Oil Based Polyols on the Properties of Flexible Polyurethane Foams Blown by Distilled Water. *Energy Procedia*. 2016. Vol. 89. P. 177–185.
5. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Современные энергоэффективные конструкционные и облицовочные строительные материалы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 76–87.
6. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Характеристика современных материалов для облицовки фасадов и цоколей зданий и сооружений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 4. С. 55–61.
7. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 96–114.
8. Дворко И.М. Пенопласты и поропласты на основе новолачных фенолоформальдегидных композиций (обзор) // Пластические массы. 2003. № 7. С. 17–20.
9. Дворко И.М., Мохов М.В. Пенопласты нового поколения // Аналитический портал химической промышленности «Новые химические технологии». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.newchemistry.ru/letter.php?nid=959> (дата обращения 06.10.2020).
10. Медведева К.А., Милославский Д.Г., Черезова Е.Н., Готлиб Е.М. Изучение процесса вспенивания эпоксидной смолы в присутствии новых полиаминоалкилфенолов, выполняющих функции отвердителя и вспенивающего агента // Бутлеровские сообщения. 2015. № 1. С. 96–100.
11. Берлин А.А., Шутов Ф.А. Пенополимеры на основе реакционноспособных олигомеров. М.: Химия, 1978. 296 с.
12. Дятлов В.А. Акрилимидобразующие полимеры: синтез, свойства и применение: дис. ... докт. хим. наук. Москва, 2015. 496 с.
13. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Гуреева Е.В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды // Труды ВИАМ. 2013. № 11. С. 1.
14. Каблов Е.Н., Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Столяков Ю.В., Румянцев Т.В. Пенополиимиды // Труды ВИАМ. 2015. № 4. С. 9.
15. Петрова Г.Н., Перфилова Д.Н., Малышенов С.В., Кузнецова К.Р. Влияние масштабного фактора на уровень свойств пенополиакрилимиды // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). С. 39–47.
16. Дрогоморецкий А.В. Инновационные строительные материалы как инструмент стратегического развития отрасли // Фотинские чтения. 2014. № 1. С. 113–118.
17. Бегляров А.Э., Землянушнов Д.Ю., Жабин Д.В. Неопорбетон объемного прессования // Приволжский научный журнал. 2012. № 3. С. 75–79.
18. Cadere C.A., Barbuta M., Rosca B., Serbanoiu A.A., Burlacu A., Oancea I. Engineering properties of concrete with polystyrene granules. *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 22. P. 288–293.
19. Бакирова И.Н., Зенитова Л.А. Газонаполненные полимеры: учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. 105 с.
20. Ибрагимов Р.Г., Нефедьев Е.С., Галлямов Р.Т., Хайруллин М.И. Современные технологии производства сепараторов для аккумуляторных батарей из полимерных материалов // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 18. С. 52–64.
21. Галиуллин М.М., Баязитов М.И., Репин В.В., Хафизов Ф.М. Использование интегральных пенопластов для повышения эффективности изоляции трубопроводов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 3. С. 314–329.
22. Кахраманлы Ю.Н. Пенополимерные нефтяные сорбенты. Экологические проблемы и их решения. Баку: «Элм», 2012. 305 с.
23. Берлин А.А., Шутов Ф.А. Упрочненные газонаполненные пластмассы. М.: Химия, 1980. 224 с.
24. Afolabi L.O., Ariff Z.M., Hashim S.F.S., Alomayri T., Mahzan S., Kamarudin K.-A., Muhammad I.D. Syntactic foams formulations, production techniques, and industry applications: a review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 5. P. 10698–10718.
25. Соколов И.И., Коган Д.И., Раскутин А.Е., Бабин А.Н., Филатов А.А., Морозов Б.Б. Многослойные конструкции со сферопластиками для изделий авиационной техники // Конструкции из композиционных материалов. 2014. № 1. С. 37–42.
26. Халиков Д.А. Классификация теплоизоляционных материалов по функциональному назначению // Фундаментальные исследования. 2014. № 11–6. С. 1287–1291.
27. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на неорганической основе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 9. С. 64–75.
28. Воробьев В.А., Андрианов Р.А. Полимерные теплоизоляционные материалы. М.: Издательство литературы по строительству, 1972. 320 с.
29. Журавлева И.И., Акопян В.А. Высокомолекулярные соединения. Часть VI. Синтетические полимеры: учебное пособие. Самара: Издательство «Самарский университет», 2014. 528 с.