

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-52-63

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНТИПИРЕНОВ НА ГОРЮЧЕСТЬ И ПОКАЗАТЕЛЬ ТЕКУЧЕСТИ РАСПЛАВА АЛИФАТИЧЕСКИХ ПОЛИАМИДОВ

С.В. Кондрашов¹, Л.В. Соловьянчик¹, С.А. Ларионов¹, О.С. Вольный¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния антипиренов на горючесть и показатель текучести расплава алифатических полиамидов марок ПА 66Л, ПА 610Л и ПА 66КС. Степень этого влияния находится в зависимости от марки полиамида, типа антипирена и его количественного содержания. В ряду выбранных марок полиамидов наибольшей текучестью обладает полиамид ПА 66Л. Показана эффективность использования декабромдифенилоксида и триоксида сурьмы для снижения продолжительности остаточного горения полиамидов исследованных марок; определены композиции, относящиеся к категории «самозатухающие».

Ключевые слова: полиамид, антипирены, модифицированные композиции на основе полиамидов, термопласт, декабромдифенилоксид, триоксид сурьмы, показатель текучести расплава, горючесть, самозатухающий

Для цитирования: Кондрашов С.В., Соловьянчик Л.В., Ларионов С.А., Вольный О.С. Исследование влияния антипиренов на горючесть и показатель текучести расплава алифатических полиамидов // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-52-63.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FLAME RETARDANTS ON THE FLAMMABILITY AND FLUIDITY OF THE MELT OF ALIPHATIC POLYAMIDES

S.V. Kondrashov¹, L.V. Solovyanchik¹, S.A. Larionov¹, O.S. Volny¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of fire retardants on the flammability and melt flow rate of aliphatic polyamides of the PA 66L, PA 610L, PA 66KS grades. The degree of this influence depends on the grade of polyamide, the type of fire retardant and its quantitative content. Among the selected grades of polyamides, polyamide PA 66L has the highest fluidity. The efficiency of using decabromodiphenyloxide and antimony trioxide to reduce the duration of residual combustion of polyamides of the studied brands is shown, compositions related to the category of «self-extinguishing» are determined.

Keywords: polyamide, flame retardants, modified compositions based on polyamides, thermoplastics, decabromodiphenyloxide, antimony trioxide, melt fluidity index, combustibility, self-extinguishing

For citation: Kondrashov S.V., Solovyanchik L.V., Larionov S.A., Volny O.S. Investigation of the effect of flame retardants on the flammability and fluidity of the melt of aliphatic polyamides. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-52-63.

Введение

В настоящее время термопласты используются в различных отраслях промышленности при производстве волокон, литевых изделий, пленок, клеев, связующих для композиционных материалов и т. д. [1–5]. Особое место среди термопластов занимают кристаллические полимеры – в частности полиамиды. Поскольку данный класс полимеров является пожароопасным, задача снижения их горючести крайне актуальна. Однако полиамиды очень чувствительны к введению добавок, поэтому при выборе антипиренов должны быть учтены такие факторы, как термическая стабильность, совместимость с полимером, токсичность, склонность к «выпотеванию», окрашиваемость, способность вызывать коррозию и т. д. [6].

Как правило, органические хлорсодержащие антиперены менее эффективны в алифатических полиамидах, чем в других полимерах [7]. Этот класс антиперенов снижает термическую стабильность полиамидов [8], так как инициирует ацидолиз полиамида выделяющимися галогеноводородами. В присутствии хлорсодержащих добавок полиамиды склонны к интенсивному каплепадению.

Высокая токсичность продуктов горения полимерных материалов с хлорсодержащими антипиренами существенно ограничивает области их применения по экологическим соображениям [9, 10].

Альтернативой хлорсодержащим антипиренам являются азотсодержащие соединения, которые проявляют огнегасящий эффект за счет выделения при термолизе и горении полимерных композитов газов, разбавляющих газообразные продукты горения. Огнегасящий эффект азотсодержащих антипиренов объясняется образованием на поверхности полимерного материала слоя из термостабильных структур, включающих конденсированные гетероциклические ядра с сопряженными C=N-связями [11].

Из различных классов азотсодержащих соединений наибольшее практическое применение получили симм-триазин и его производные. Например, 1,3,5-триазин-2,4,6-триамин (меламин) широко применяется как замедлитель горения в полиамиде 6. Механизм действия меламина заключается в его эндотермической сублимации и снижении концентрации кислорода в зоне горения [12]. Кроме того, в конденсированной фазе меламин подвергается эндотермической самоконденсации с выделением аммиака и образованием небольшого количества твердого термостабильного остатка на поверхности горящего полимера.

Однако меламин и его производные повышают текучесть расплава и склонность к каплепадению во время горения полиамида 6 [13].

Для предотвращения этого эффекта могут использоваться минеральные кислоты: H_3BO_3 и H_3PO_4 [14]. Действие данных антиперенов обусловлено, например, тем, что H_3BO_3 при высоких температурах вначале переходит в HBO_3 , а затем в $\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и, наконец, в B_2O_3 . При этом на каждой стадии происходит выделение молекулы воды. В свою очередь, образование негорючих продуктов разложения H_3BO_3 (H_2O и B_2O_3) будет способствовать снижению температуры в предпламенной зоне. Фосфорная же кислота при нагревании может легко превращаться в полифосфорную кислоту, которая является дегидратирующим и фосфорилирующим агентом, способствуя процессам карбонизации [15].

В работе [16] для повышения огнестойкости полимерных материалов в качестве антиперенов использованы соли на основе меламина (МА), борной (БК) и фосфорной кислот (ФК) – соответственно, МА/БК и МА/ФК. Показано, что введение в полиамид 10 % (по массе) МА/БК увеличивает кислородный индекс с 21 до 28. Однако величина

показателя текучести расплава (ПТР) в такой композиции уменьшалась с 17,8 до 1,3 г/10 мин.

К негалогенсодержащим антипиренам для полиамида 6 также относят красный фосфор [17].

Для получения полиамидной (в том числе стеклонаполненной) композиции, обладающей свойствами огнестойкости, возможно использовать синергетическую систему, состоящую из триазинового и фосфорсодержащего соединений. Синергетический эффект заключается в комбинированном действии антипиренов. При горении полимера пары триазинового соединения уменьшают концентрацию кислорода и горючих газов, а фосфорсодержащее соединение способствует образованию карбонизированного слоя на поверхности полимера. Карбонизированный слой защищает нижележащие слои полимера от воздействия пламени и затрудняет доступ кислорода [18].

Одновременно уменьшить вязкость расплава и снизить характеристики пожарной опасности материала позволяет введение в литьевую композицию декабромдифенилоксида (ДБДФО) совместно с полибутилентерефталатом (ПБТ) [19–21]. Например, введение добавки 10 % (по массе) ПБТ + 6 % (по массе) ДБДФО в поликарбонат позволило авторам работы [20] увеличить величину кислородного индекса на ~50 % с одновременным возрастанием ПТР с 11 до 18 г/10 мин. При этом предел прочности уменьшился на 10 %, а удлинение – на 21 %. Кроме того, испытания показали, что введение антипирена ДБДФО в состав композиций позволяет снизить максимальную скорость выделения тепла и общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин на 18–40 % и увеличить время достижения максимума тепловыделения на 26–40 %.

По сравнению с фосфатом меламина введение в ПБТ соединения ДБДФО позволяет уменьшить время остаточного горения композиции в 2 раза и устранить эффект каплепадения. Снижение предела прочности ПБТ при его модификации ДБДФО и фосфатом меламина составляет 7 и 72 % соответственно [22]. Свойства бромсодержащих соединений как эффективных замедлителей реакции горения с умеренным дымообразованием отметили авторы работы [23].

Соединение ДБДФО оказывается также эффективным средством для повышения огнестойкости полидодекалактама (полиамида ПА-12) [24, 25]. Исследования по дымообразованию показали, что композиция ПА-12 с добавками ДБДФО в количестве 3 % (по массе) входит в третью группу среднедымящих материалов, величина кислородного индекса составляет 28. Снижение максимальной скорости выделения тепла и общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин оказывается на 25 % меньше по сравнению с исходным материалом. Однако в отличие от ПБТ при горении композиции наблюдается эффект каплепадения, но капли не горят.

Возможное решение проблемы каплепадения заключается в использовании бромсодержащих антипиренов совместно с оксидами металлов [7]. Например, триоксид сурьмы, обладая синергетическими свойствами [26], снижает каплепадение и способствует увеличению коксового остатка. Предполагается, что в данном случае огнегасящий эффект обеспечивается процессами, протекающими в конденсированной фазе. Радикалы брома, генерируемые антипиреном, вызывают дегидрирование полиамида, но образующийся НВг не переходит в газовую фазу, а реагирует с триоксидом сурьмы и полимером.

Несмотря на тот факт, что комбинация бромсодержащих антипиренов и оксидов металлов используется для придания огнестойких средств литьевым композициям из

различных термопластов [27–29], механизм их совместного действия не выяснен до конца. Так, исследования, проведенные авторами работы [30], показали, что этот многообразный процесс не определяется аддитивными правилами, а является существенно более сложным и требуются дальнейшие тщательные исследования для его выяснения.

Следует отметить, что использование комбинации ДБДФО с триоксидом сурьмы в соотношении 15 и 5 % (по массе) соответственно в литевой композиции с полиамидом 6 снижает скорость тепловыделения до 627 кВт/м^2 (скорость тепловыделения при горении чистого полиамида 6 составляет 1120 кВт/м^2).

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [31–34].

Материалы и методы

В качестве полимерных матриц для исследований выбраны литевые марки полиамидов ПА 610Л, ПА 66Л и ПА 66КС (стеклонаполненный). По причине высокого влагопоглощения полиамид 6 не исследовали.

Ключевыми преимуществами полиамида ПА 610Л является низкий коэффициент влагопоглощения, низкая подверженность температурным деформациям, высокие электроизоляционные и антифрикционные свойства, высокая размеростабильность деталей и стойкость к действию горюче-смазочных материалов, щелочам и грибам, а также стойкость к действию окружающей среды.

Полиамид ПА 66 отличается химической и климатической стойкостью, устойчив к смазочным материалам и нефтепродуктам, а также к растворителям органического происхождения. По сравнению с полиамидом 6 полиамид ПА 66 имеет меньшую степень влагопоглощения, обладает более высокой теплостойкостью и лучшими электроизоляционными характеристиками. Температура плавления полиамида ПА 66 составляет $\sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$, он сохраняет форму при температуре вплоть до $180 \text{ }^\circ\text{C}$.

В качестве антипиренов для снижения горючести выбраны декабромдифенилоксид (ДБДФО, $\text{C}_{12}\text{Br}_{10}\text{O}$) и триоксид сурьмы (Sb_2O_3). Концентрация антипиренов составляла от 3 до 6 % (по массе).

Получение термопластичных полиамидных композиций проводили по расплавной технологии путем совмещения компонентов с применением двухшнекового экструдера. Данное оборудование при наличии двух шнеков и оптимального соотношения длины шнеков к их диаметру позволило обеспечить необходимое сдвиговое усилие для равномерного диспергирования компонентов композиции в объеме полиамидной матрицы.

Исследования ПТР проводили после предварительного нагрева в течение 240 с при одинаковой нагрузке (21,6 Н) и диаметре капилляра 2,095 мм. В связи с различием полиамидов исследуемых марок температура испытания выбрана на $20 \text{ }^\circ\text{C}$ больше их температур плавления и наиболее близко соответствует температурному режиму их переработки.

Испытания по определению горючести материалов проводили при вертикальной ориентации образца согласно АП-25 (Приложение F, Часть 1, подпункт 4 пункта (b)).

Результаты и обсуждение

Согласно условиям проведения испытаний, представленным в табл. 1 (ГОСТ 11645–73), результаты исследования ПТР исходных полиамидов марок ПА 610Л, ПА 66Л и ПА 66КС, приведены на рис. 1.

Условия проведения испытаний

Полиамид	Параметры	Температура, °С
ПА 610Л	Нагрузка 21,6 Н	245
ПА 66Л	Диаметр капилляра 2,095 мм	270
ПА 66КС	Время преднагрева 240 с	270

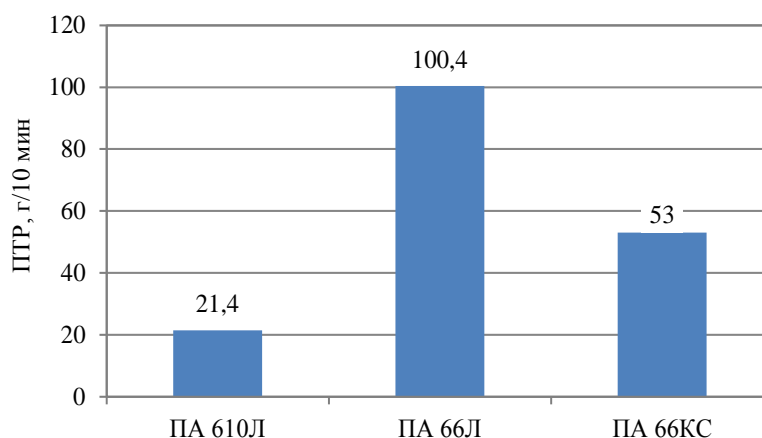


Рис. 1. Показатель текучести расплава (ПТР) исходных полиамидов марок ПА 610Л, ПА 66Л и ПА 66КС

Результаты испытаний, представленные на рис. 1, демонстрируют, что в ряду выбранных марок полиамидов наибольшей текучестью обладает полиамид ПА 66Л. Ведение в полиамид марки ПА 66 30 % (по массе) стеклянных волокон (полиамид марки ПА 66КС) приводит к снижению текучести расплава в 2 раза. Полиамид марки ПА 610Л характеризуется существенно более низким значением ПТР относительно аналогичного показателя для полиамида марки ПА 66Л, однако, в связи с меньшей температурой плавления (250 °С), возможна его переработка при более низких температурах.

Результаты исследований влияния типа и концентрации антипирена на ПТР полиамидов приведены на рис. 2.

По результатам исследований, представленных на рис. 2, установлено, что антипирен ДБДФО ($C_{12}Br_{10}O$) для всех исследуемых полиамидных матриц увеличивает текучесть расплава. Например, при его введении в состав полиамида марки ПА 610Л значение ПТР возрастает на 8,1 % (с 21,4 до 24,5 г/10 мин) при 3 % (по массе) и на 20,2 % (до 27,3 г/10 мин) при 6 % (по массе). Аналогичный эффект наблюдается для полиамида марки ПА 66Л: при введении 3 % (по массе) ДБДФО значение ПТР возрастает на 8,1 % (с 100,4 до 108,5 г/10 мин) и на 20,2 % (до 120,7 г/10 мин) при 6 % (по массе).

Следует отметить, что наибольшее увеличение текучести наблюдается в случае стеклонаполненного полиамида марки ПА 66КС. При введении 3 и 6 % (по массе) ДБДФО значение ПТР составляет 66,5 и 85,2 г/10 мин соответственно, что на 25,5 и 60,8 % больше относительно значений для исходного полиамида ПА 66КС.

Для композиций, содержащих антипирен в виде триоксида сурьмы, наблюдается противоположный эффект – текучесть расплава снижается относительно исходных полиамидных матриц.

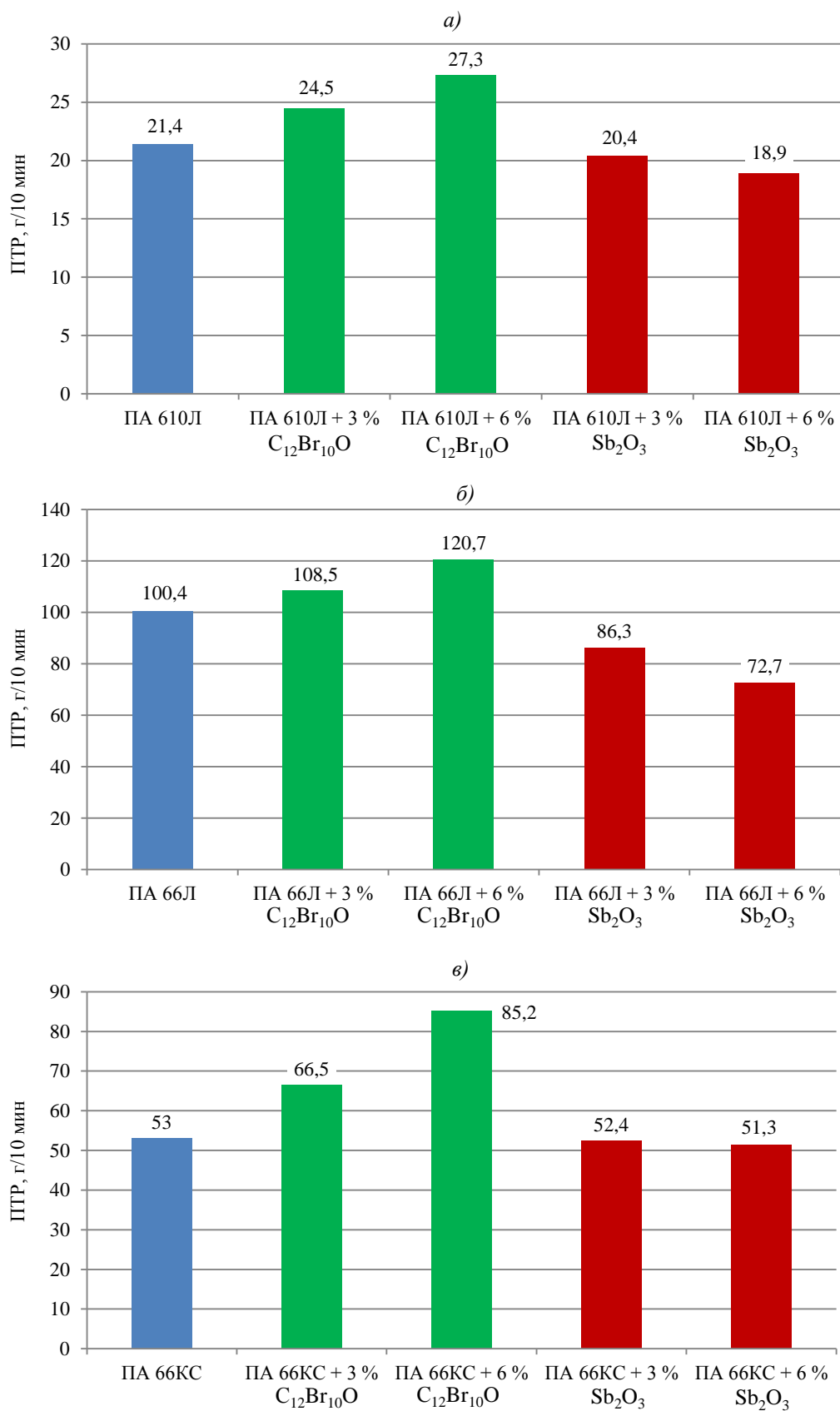


Рис. 2. Влияние природы и количественного содержания (в % (по массе)) антипиренов на показатель текучести расплава (ПТР) композиций на основе ПА 610Л (а), ПА 66Л (б) и ПА 66КС (в)

Так, для полиамида марки ПА 610Л при введении 3 % (по массе) Sb_2O_3 происходит снижение значений ПТР на 4,7 % (с 21,4 до 20,4 г/10 мин) и на 11,7 % (до 18,9 г/10 мин) при 6 % (по массе) Sb_2O_3 . Текучесть расплава композиции на основе полиамида марки ПА 66Л снижается на 14 % (с 100,4 до 86,3 г/10 мин) при 3 % (по массе) антипирена и на 27,6 % (до 72,7 г/10 мин) при 6 % (по массе).

В то же время триоксид сурьмы в ряду исследованных полиамидов в наименьшей степени влияет на снижение значений ПТР композиции на основе полиамида марки ПА 66КС – текучесть расплава снижается на 1,1 % (с 53,0 до 52,4 г/10 мин) при 3 % (по массе) антипирена и на 3,2 % (до 51,3 г/10 мин) при 6 % (по массе).

В соответствии с АП-25, Приложение F, Часть 1 проведены исследования влияния типа антипирена и его количества на горючесть термопластичных полиамидных композиций (продолжительность экспозиции пламенем горелки составляет 12 с). Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты испытаний на горючесть композиций
на основе полиамидов марок ПА 610Л, ПА 66Л и ПА 66КС**

Состав композиции	Продолжительность остаточного горения, с	Длина обугливания, мм	Продолжительность горения капель, с	Классификация по ОСТ 1 90094–79
ПА 66Л	18	32	0	Сгорающий
ПА 66Л + 3 % (по массе) ДБДФО*	11	15	0	Самозатухающий
ПА 66Л + 6 % (по массе) ДБДФО	6	13	0	Самозатухающий
ПА 66Л + 3 % (по массе) Sb_2O_3	8	27	0	Самозатухающий
ПА 66Л + 6 % (по массе) Sb_2O_3	42	30	>5	Сгорающий
ПА 610Л	16	29	0	Сгорающий
ПА 610Л + 3 % (по массе) ДБДФО	17	23	0	Сгорающий
ПА 610Л + 6 % (по массе) ДБДФО	12	15	0	Самозатухающий
ПА 610Л + 3 % (по массе) Sb_2O_3	17	30	2	Сгорающий
ПА 610Л + 6 % (по массе) Sb_2O_3	>60	41	3	Сгорающий
ПА 66КС	>60	49	>5	Сгорающий
ПА 66КС + 3 % (по массе) ДБДФО	36	37	>5	Сгорающий
ПА 66КС + 6 % (по массе) ДБДФО	32	45	>5	Сгорающий
ПА 66КС + 3 % (по массе) Sb_2O_3	32	40	>5	Сгорающий
ПА 66КС + 6 % (по массе) Sb_2O_3	40	46	>5	Сгорающий
Допустимые значения по АП-25, пункт 25.853 (а)	Не более 15	Не более 203	Не более 5	–
* Декабромдифенилоксид ($C_{12}Br_{10}O$).				

По результатам исследования установлено, что к категории «самозатухающих» относятся композиции на основе полиамида ПА 66Л с 3 и 6 % (по массе) ДБДФО и 3 % (по массе) триоксида сурьмы, а также композиция на основе ПА 610Л, содержащая 6 % (по массе) ДБДФО. Все остальные исследованные композиции являются сгорающими материалами.

Следует отметить, что для композиции на основе полиамида марки ПА 610Л с содержанием 6 % (по массе) триоксида сурьмы происходит значительное увеличение продолжительности остаточного горения (более 60 с) в сравнении с исходным полиамидом (16 с).

С точки зрения горючести выбранные антипирены при определенных концентрациях доказали свою эффективность в части снижения продолжительности остаточного горения полиамидов.

Наиболее заметное снижение продолжительности остаточного горения наблюдается для полиамида марки ПА 66КС, что обусловлено эффектом низкой базы. Существенный эффект достигается при содержании 3 % (по массе) триоксида сурьмы,

однако при дальнейшем увеличении количества антипирена уменьшения продолжительности остаточного горения не происходит.

Наибольшее положительное влияние на снижение горючести полиамида марки ПА 66Л оказывает антипирен ДБДФО.

Заключения

Антипирены ДБДФО и триоксид сурьмы доказали свою эффективность и могут применяться для снижения продолжительности остаточного горения полиамидов исследованных марок с учетом выбора их оптимальной концентрации.

В результате исследований установлено, что требованиям АП-25 (Приложение F, Часть 1) (категория материалов «самозатухающие») соответствуют композиции на основе полиамида ПА 66Л, содержащие 3 и 6 % (по массе) ДБДФО и 3 % (по массе) триоксида сурьмы, а также композиция на основе полиамида ПА 610Л, содержащая 6 % (по массе) ДБДФО.

Показано, что в зависимости от типа и количественного содержания в составе полиамидной матрицы антипирены влияют не только на горючесть, но и на текучесть композиции. Антипирен ДБДФО для всех полиамидных матриц увеличивает значения ПТР, в то же время для композиций, содержащих антипирен в виде триоксида сурьмы, наблюдается противоположный эффект – текучесть расплава снижается относительно исходных полиамидных матриц.

Список источников

1. Сорокин А.Е., Сагомонова В.А., Петрова А.П., Соловьянчик Л.В. Технологии получения полимерных композиционных материалов на основе термопластичной матрицы (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-78-86.
2. Гуреньков В.М., Горшков В.О., Чеботарев В.П., Прудскова Т.Н., Андреева Т.И. Сравнительный анализ свойств полиэфирэфиркетона отечественного и зарубежного производства // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 41–47. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-41-47.
3. Гуляев А.И., Медведев П.Н., Сбитнева С.В., Петров А.А. Экспериментальное исследование по оценке адгезионной прочности «волоконно–матрица» в углепластиках на основе эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
4. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
5. Сорокин А.Е., Бейдер Э.Я., Изотова Т.Ф., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Исследование свойств углепластика на полифениленсульфидном связующем после ускоренных и натуральных климатических испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 3 (42). С. 66–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-66-72.
6. Берлин А.А. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести // Соровский образовательный журнал. 1996. № 4. С. 16–24.
7. Копылов В.В., Новиков С.Н., Оксентьевич Л.А. и др. Полимерные материалы с пониженной горючестью. М.: Химия, 1986. 222 с.
8. Mailhos-Lefievre V., Sallet D., Martel B. Thermal degradation of pure and flame-retarded polyamides 11 and 12 // Polymer degradation and stability. 1989. Vol. 23. No. 4. P. 327–336.
9. Чижова М.А., Хайруллин Р.З. Токсичность продуктов горения полимерных материалов при введении в их состав антипиренов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 9. С. 144.

10. Дзивицкая Г.Г., Хатенко А.С., Островская Л.Е., Ксенофонтов М.А. Влияние огнеретардантов на повышение термостойкости и огнесопротивляемости пенополиуретанов // Тезисы докладов XII симпозиума «Современная химическая физика». Туапсе, 2000. С. 38.
11. Богданова В.В. Огнегасящий эффект замедлителей горения в синтетических полимерах и природных горючих материалах // Химические проблемы создания новых материалов и технологий: сб. ст. Минск, 2003. Вып. 2. С. 344–375.
12. Levchik S.V., Balabanovich A.I., Levchik G.F., Costa L. Effect of melamine and its salts on combustion and thermal decomposition of polyamide 6 // *Fire and Materials*. 1997. Vol. 21. No. 2. P. 75–83.
13. Левчик С.В. Исследования закономерностей действия огнеретардантов в алифатических полиамидах. М.: Химия, 1998. С. 3–13.
14. Борукаев Т.А., Саблирова Ю.М., Микитаев А.К. Использование соединений бора в качестве эффективных антипиренов для полимерных материалов // *Материаловедение*. 2006. № 5. С. 29–34.
15. Заиков Г.Е., Арцис М.И. Антипирены для полимерной промышленности // *Пластические массы*. 2000. № 8. С. 48–54.
16. Борукаев Т.А., Отарова Р.М., Шаов А.Х., Хараев А.М. Влияние добавки солей на основе меламина и минеральных кислот на огнестойкость, физико-механические свойства полиамида-6 и полипропилена // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2016. No. 1. P. 20–25.
17. Fang K., Li J., Ke C. et al. Intumescent flame retardation of melamine-modified montmorillonite on polyamide 6: Enhancement of condense phase and flame retardance // *Polymer Engineering & Science*. 2011. Vol. 51. No. 2. P. 377–385.
18. Костюченко М.А., Ревяко М.М. Исследование влияния комбинированных антипиренов «фосфор + триазин» на горючесть и эксплуатационные свойства экструзионных полиамидов // *Труды БГТУ*. 2012. № 4. С. 40–43.
19. Платонов М.М., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Барботько С.Л. Оптимизация состава полимерной композиции с пониженной пожарной опасностью на основе поликарбоната для технологии 3D-печати расплавленной полимерной нитью // *Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. № 1. С. 87–94.
20. Петрова Г.Н., Румянцева Т.В., Бейдер Э.Я. Влияние модифицирующих добавок на пожаробезопасные свойства и технологичность поликарбоната // *Труды ВИАМ*. 2013. № 6. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.10.2021).
21. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Повышение огнестойкости полибутилентерефталата (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 4 (33). С. 58–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-58-64.
22. Ермакова Н.В. О дымообразующей способности отделочных материалов // *Auditorium*. 2017. № 3 (15). С. 104–107.
23. Платонов М.М., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Барботько С.Л. Полимерная композиция на основе полидодекалактама для технологии 3D-печати расплавленной полимерной нитью // *Труды ВИАМ*. 2016. № 10 (46). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-9-9.
24. Петрова Г.Н., Сапего Ю.А., Ларионов С.А., Платонов М.М., Лаптев А.Б. Пожаробезопасные термопластичные материалы для 3D-технологии // *Труды ВИАМ*. 2017. № 9 (57). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-7-7.
25. Ушков В.А. Воспламеняемость и дымообразующая способность полимерных композиционных материалов // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 8 (107). С. 897–903.
26. Fox D.W. Thermally stable flame-retardant thermoplastic molding composition: pat. US 4028335; filed 23.08.76; publ. 07.06.77.
27. Ohkawa Y. Flame-Retardant Polyamide Composition and Use Thereof: pat. US 10587713; filed 25.01.05; publ. 19.04.07.

28. Baer M. Flame retardant resin compositions: pat. US 4205142; filed 02.11.77; publ. 27.05.80.
29. Халтуринский Н.А., Рудакова Т.А. Физические аспекты горения полимеров и механизм действия ингибиторов // *Химическая физика*. 2008. Vol. 27. No. 6. P. 73–84.
30. Hu Y., Wang S., Ling Z. et al. Preparation and combustion properties of flame retardant nylon 6/montmorillonite nanocomposite // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2003. Vol. 288. No. 3. P. 272–276.
31. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
32. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
33. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
34. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Перфилова Д.Н. Полимерные композиционные материалы на термопластичной матрице // *Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология*. 2016. Т. 59. № 10. С. 61–71.

References

1. Sorokin A.E., Sagomonova V.A., Petrova A.P., Solovyanchik L.V. Manufacturing technologies of polymer composite materials on thermoplastics (review).). *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 6, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-78-86.
2. Gurenkov V.M., Gorshkov V.O., Chebotarev V.P., Prudskova T.N., Andreeva T.I. Comparative analysis of properties of polyetheretherketone of domestic and foreign production. *Авиационные материалы и технологии*, 2019, no. 3 (56), pp. 41–47. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-41-47.
3. Gulyaev A.I., Medvedev P.N., Sbitneva S.V., Petrov A.A. Experimental research of «fiber–matrix» adhesion strength in carbon fiber epoxy/polysulphone composite. *Авиационные материалы и технологии*, 2019, no. 4 (57), pp. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
4. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lons-kii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Авиационные материалы и технологии*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
5. Sorokin A.E., Bejder E.Ya., Izotova T.F., Nikolaev E.V., Shvedkova A.K. Investigation of carbon fiber reinforced plastic on polyphenylenesulfide resin after accelerated and natural climatic test. *Авиационные материалы и технологии*, 2016, no. 3 (42), pp. 66–72. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-66-72.
6. Berlin A.A. Combustion of polymers and low flammability polymeric materials. *Sorovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 1996, no. 4, pp. 16–24.
7. Kopylov V.V., Novikov S.N., Oksentevich L.A. et al. *Polymeric materials with reduced flammability*. Moscow: Khimiya, 1986, 222 p.
8. Mailhos-Lefievre V., Sallet D., Martel B. Thermal degradation of pure and flame-retarded polyamides 11 and 12. *Polymer degradation and stability*, 1989, vol. 23, no. 4, pp. 327–336.
9. Chizhova M.A., Khairullin R.Z. Toxicity of combustion products of polymeric materials with the introduction of flame retardants into their composition. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 9, pp. 144.
10. Dzivitskaya G.G., Khatenko A.S., Ostrovskaya L.E., Ksenofontov M.A. Influence of fire retardants on increasing the thermal stability and fire resistance of polyurethane foams. *Abstracts of the XII Symposium "Modern Chemical Physics"*. Tuapse, 2000, p. 38.
11. Bogdanova V.V. Fire-extinguishing effect of flame retardants in synthetic polymers and natural combustible materials. *Chemical Problems of Creating New Materials and Technologies: collect. of articles*. Minsk, 2003, is. 2, pp. 344–375.

12. Levchik S.V., Balabanovich A.I., Levchik G.F., Costa L. Effect of melamine and its salts on combustion and thermal decomposition of polyamide 6. *Fire and Materials*, 1997, vol. 21, no. 2, pp. 75–83.
13. Levchik S.V. *Studies of the regularities of the action of fire retardants in aliphatic polyamides*. Moscow: Khimiya, 1998, pp. 3–13.
14. Borukaev T.A., Sablirova Yu.M., Mikitaev A.K. The use of boron compounds as effective flame retardants for polymeric materials. *Materialovedenie*, 2006, no. 5, pp. 29–34.
15. Zaikov G.E., Artsis M.I. Flame retardants for the polymer industry. *Plasticheskiye massy*, 2000, no. 8, pp. 48–54.
16. Borukaev T.A., Otarova R.M., Shaov A.Kh., Kharaev A.M. The influence of the addition of salts based on melamine and mineral acids on the fire resistance, physical and mechanical properties of polyamide-6 and polypropylene. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2016, no. 1, pp. 20–25.
17. Fang K., Li J., Ke C. et al. Intumescent flame retardation of melamine-modified montmorillonite on polyamide 6: Enhancement of condense phase and flame retardance. *Polymer Engineering & Science*, 2011, vol. 51, no. 2, pp. 377–385.
18. Kostyuchenko M.A., Revyako M.M. Study of the influence of combined flame retardants "phosphorus + triazine" on the combustibility and performance properties of extruded polyamides. *Trudy BGTU*, 2012, no. 4, pp. 40–43.
19. Platonov M.M., Petrova G.N., Larionov S.A., Barbotko S.L. Optimization of the composition of a polymer composition with a reduced fire hazard based on polycarbonate for 3D printing technology with a molten polymer thread. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser.: Chemistry and chemical technology*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 87–94.
20. Petrova G.N., Rumyantseva T.V., Beyder E.Ya. Influence of modifying additives on fireproof properties and technological effectiveness of polycarbonate. *Trudy VIAM*, 2013, no. 6, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 13, 2021).
21. Petrova G.N., Beyder E.Ya. Increasing of fire resistance of polybutylene terephthalate (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, No. 4, pp. 58–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-58-64.
22. Ermakova N.V. On the smoke-generating ability of finishing materials. *Auditorium*, 2017, no. 3 (15), pp. 104–107.
23. Platonov M.M., Petrova G.N., Larionov S.A., Barbotko S.L. Polymer composition on the basis of polydodecanolactam for 3D-printing technology by melted polymer string. *Trudy VIAM*, 2016, no. 10, paper no. 9. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-9-9.
24. Petrova G.N., Sapego Yu.A., Larionov S.A., Platonov M.M., Laptev A.B. Fireproof thermoplastic materials for 3D-technologies. *Trudy VIAM*, 2017, no. 9, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-7-7.
25. Ushkov V.A. Flammability and smoke-forming ability of polymer composite materials. *Vestnik MGSU*, 2017, vol. 12, no. 8 (107), pp. 897–903.
26. Fox D.W. *Thermally stable flame-retardant thermoplastic molding composition*: pat. US 4028335; filed 23.08.76; publ. 07.06.77.
27. Ohkawa Y. *Flame-Retardant Polyamide Composition and Use Thereof*: pat. US 10587713; filed 25.01.05; publ. 19.04.07.
28. Baer M. *Flame retardant resin compositions*: pat. US 4205142; filed 02.11.77; publ. 27.05.80.
29. Khalturinsky N.A., Rudakova T.A. Physical aspects of combustion of polymers and the mechanism of action of inhibitors. *Khimicheskaya fizika*, 2008, vol. 27, no. 6, pp. 73–84.
30. Hu Y., Wang S., Ling Z. et al. Preparation and combustion properties of flame retardant nylon 6/montmorillonite nanocomposite. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2003, vol. 288, no. 3, pp. 272–276.

31. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
32. Kablov E.N. Aerospace materials science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2008, no. 3, pp. 2–14.
33. Kablov E.N. Chemistry in aviation materials science. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
34. Kablov E.N., Semenova L.V., Petrova G.N., Larionov S.A., Perfilova D.N. Polymer composite materials on a thermoplastic matrix. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser.: Chemistry and chemical technology*, 2016, vol. 59, no. 10, pp. 61–71.

Информация об авторах

Кондрашов Станислав Владимирович, заместитель начальника лаборатории по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Соловьянчик Людмила Владимировна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ларионов Сергей Александрович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вольный Олег Светозарович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Stanislav V. Kondrashov, Deputy Head of Laboratory for Science, Doctor of Technical Sciences, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Lyudmila V. Solovyanchik, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Larionov First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oleg S. Volny, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.11.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.11.2021.
The article was submitted 17.11.2021; approved and accepted for publication after reviewing 19.11.2021.