

УДК 614.849

СНИЖЕНИЕ ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ И ТОКСИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ ПОЛИЭФИРНЫХ ТКАНЕЙ

Аксенов С.Г.

*д-р э.н., профессор,
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г. Уфа*

Кулемин В.О.

*студент,
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,
РФ, г. Уфа*

Аннотация. В статье рассмотрены современные подходы к решению проблемы повышенной пожарной опасности синтетических текстильных материалов, широко используемых в быту, на транспорте и в промышленности. Проанализированы механизмы горения и термоокислительной деструкции полиэфирных, полиамидных и полиакрилонитрильных волокон, выявлены ключевые факторы, способствующие быстрому распространению пламени и выделению токсичных продуктов сгорания. Проведен сравнительный анализ методов огнезащиты, включая химическую модификацию сырья, введение антипиренов на стадии формирования волокна и поверхностную обработку готовых материалов.

Ключевые слова: синтетические текстильные материалы, пожарная опасность, огнезащита, антипирены, термопластичность.

REDUCING THE FLAMMABILITY AND TOXICITY OF COMBUSTION PRODUCTS OF POLYESTER FABRICS

Aksyonov S.G.

*Doctor of Economics, Professor,
Ufa University of Science and Technology,*

Ufa, Russian Federation

Kulemin V.O.

Student,

Ufa University of Science and Technology,

Ufa, Russian Federation

Abstract. This article examines modern approaches to addressing the increased fire hazard of synthetic textiles, which are widely used in everyday life, transportation, and industry. The combustion mechanisms and thermal-oxidative degradation of polyester, polyamide, and polyacrylonitrile fibers are analyzed, identifying key factors contributing to rapid flame propagation and the release of toxic combustion products. A comparative analysis of fire protection methods is provided, including chemical modification of raw materials, the introduction of flame retardants during fiber formation, and surface treatment of finished materials.

Keywords: synthetic textiles, fire hazard, fire protection, flame retardants, thermoplasticity.

Современная текстильная промышленность переживает эпоху доминирования синтетических волокон: полиэфирные (ПЭТ, ПБТ), полиамидные (найлон 6, найлон 66), полиакрилонитрильные (ПАН), полипропиленовые и полиуретановые материалы занимают более 65 % мирового рынка текстиля благодаря низкой стоимости, прочности, износостойкости и многообразию форм реализации – от нитей до нетканых полотен. Однако все синтетические полимеры, за редким исключением, представляют собой легковоспламеняющиеся или сгораемые субстанции, причем их пожарная опасность качественно отличается от таковой для

натуральных материалов (хлопок, шерсть, лен). Угроза исходит не только от воспламеняемости, но и от специфического поведения синтетики в условиях термического воздействия: низкая теплопроводность приводит к быстрому локальному нагреву, термопластичность вызывает плавление и стекание горящих капель, которые способны зажечь расположенные ниже поверхности, а также вызывать глубокие контактные ожоги при попадании на кожу. Кроме того, при горении и тлении синтетических тканей выделяются высокотоксичные вещества – оксиды углерода, циановодород, аммиак, хлористый водород (при наличии галогенов), фосген, акрилонитрил и множество летучих органических продуктов неполного сгорания, которые в реальных условиях пожара часто являются первопричиной гибели людей, а не само термическое воздействие. Таким образом, проблема снижения пожарной опасности синтетических текстильных материалов носит междисциплинарный характер и требует глубокого понимания как химии полимеров, так и физики горения.

Ключевая особенность горения синтетических волокон – их способность плавиться с образованием так называемого «полимерного бассейна» на поверхности, что изменяет механизм теплопередачи. В отличие от хлопка, который при нагреве обугливается, образуя защитный слой угля, затрудняющий доступ кислорода и летучих продуктов, синтетики деструктируют с выделением горючих мономеров и олигомеров в газовую фазу. Для полиэтилентерефталата горение инициируется при температурах 450–480 °С, при этом его теплотворная способность достигает 23–25 МДж/кг – сопоставима с дизельным топливом. С этим связан и высокий индекс распространения пламени: по стандарту NFPA 701 многие необработанные синтетические ткани не проходят базовые тесты на вертикальное горение, демонстрируя затухание только при отсутствии сквозняка. Для улучшения огнестойкости применяют три основные стратегии. Модификацию структуры самого полимера на этапе синтеза, введение активных добавок-антипиренов в

расплав перед формованием волокон, постизготовительную отделку ткани, пропиточную или напыляемую. Первая стратегия, безусловно, предпочтительнее с точки зрения долговечности и неизменности свойств при стирках и эксплуатации, но она технологически сложна и дорога. Наиболее распространена внутренняя антипиренная обработка с помощью дисперсий химических реагентов в процессе экструзии, что приводит к получению огнестойких волокон «в массе» [1,2].

Классические антипирены для синтетики долгое время базировались на галогенированных соединениях – производных декабромдифенилоксида, тетрабромбисфенола А, гексабромциклододекана. Механизм их действия заключается в газофазном подавлении радикальных цепных реакций горения: при нагреве атомы брома или хлора отщепляются от молекулы и взаимодействуют с высокоактивными радикалами $\text{H}\bullet$ и $\text{OH}\bullet$, рекомбинируя в стабильные молекулы HBr и H_2O . Это резко снижает концентрацию радикалов, поддерживающих цепное окисление. Однако эмиссия дыма при горении бромсодержащих тканей исключительно токсична: помимо CO и CO_2 , образуются бромоводород, полибромированные дибензодиоксины и фураны – суперэкоксиканты с канцерогенным и мутагенным действием. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях поставила большинство галогенсодержащих антипиренов вне закона, что привело к активному поиску альтернатив. Сегодня «золотой стандарт» – фосфорорганические соединения, которые действуют либо в конденсированной фазе, способствуя образованию карбонизованного слоя (шлака) на поверхности горящего материала, либо в газовой фазе как фосфорсодержащие радикалы. Например, добавление 8–10 % олигомера фосфоната к ПЭТ-волокну повышает кислородный индекс с 21–22 % до 28–30 %, причем материал перестает плавить и капать – напротив, он образует вспененный коксовый остаток, экранирующий полимер от теплового потока. В этой связи интересны разработки реакционно-способных антипиренов,

Дневник науки | www.dnevnika.ru | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

вшиваемых в полимерную цепь, например, мономеры на основе 2-карбоксииэтилфосфиновой кислоты, которые кополимеризуются с терефталевой кислотой и этиленгликолем. Полученное огнестойкое ПЭТ-волокно сохраняет стойкость к многократным стиркам и не выделяет фенольных продуктов деструкции.

Значительное место занимают также азотсодержащие антипирены, прежде всего меламин и его производные (меламин-цианурат, меламин-фосфат). При нагреве меламин сублимируется и разлагается с эндотермическим эффектом, поглощая часть тепла, при этом выделяется негорючий аммиак, разбавляющий горючие газы над поверхностью, а на самом полимере образуется сшитая азотистая структура – мелем, мелон, которые при высоких температурах графитизируются. Комбинация фосфора и азота (так называемые P-N-синергисты) оказывается чрезвычайно эффективной: фосфор катализирует дегидратацию и карбонизацию, а азот способствует выделению аммиака и вспучиванию коксового слоя. Современные коммерческие системы антипиренов, таких как Exolit OP (Clariant) или Aflammit (Thor), представляют собой именно такие фосфинатные и фосфатные композиции для полиамидов и полиэфиров. Отметим, однако, что для полиамида 6 действие чистого красного фосфора затруднено из-за его окрашивающих свойств и гидролитической нестабильности, поэтому применяются микрокапсулированные формы. Нанотехнологический подход привел к созданию гибридных систем, где наночастицы глины (монтмориллонит, галлуазит), нанотрубки (углеродные, титанатные) или полиэдрические олигомерные сисесквиоксаны (POSS) добавляются в полимерную матрицу в количествах 2–5 % масс. Основной их эффект – барьерный: пластинчатые наночастицы ориентируются в поверхностном слое при горении, резко снижая проницаемость для кислорода и летучих продуктов пиролиза. Кроме того, нанополости и карбонизованная матрица вокруг наночастиц стабилизируют коксовый остаток. Однако

существует проблема агрегирования наночастиц при переработке и их возможного вымывания при стирке – эта область требует дальнейшей инженерии поверхности [3].

Отдельная сложная задача – огнезащита эластомерных синтетических материалов, например, спандекса (полиуретановые волокна), который добавляют в смесовые ткани для придания эластичности. Полиуретаны горят чрезвычайно интенсивно, с образованием густого черного дыма, содержащего циановодород и изоцианаты. Обычные фосфорные антипирены здесь малоэффективны из-за высокой скорости деструкции уретановой группы. Более успешны комбинации с нанодисперсным гидроксидом алюминия или магния, которые разлагаются эндотермически, выделяя воду и оксиды, чем отводят тепло от поверхности. При больших наполнениях (до 30–40 %) удается достичь самозатухания, но механические свойства волокна падают, резко ухудшается эластичность. Альтернативный подход – прививочная модификация поверхности текстильного полотна методами холодной плазмы, где в приповерхностном слое (до 100 нм) создаются поперечные шивки, затрудняющие плавление и воспламенение, либо инжестируются фосфор- и кремнийсодержащие фрагменты. Такая обработка не меняет «ощущение ткани» на ощупь и может быть совмещена с гидрофобной или антибактериальной отделкой, но требует вакуумного оборудования и не подходит для объемных изделий [3].

Нельзя игнорировать и аспекты стандартизации и сертификации. В разных странах действуют различные нормативы: для текстиля в общественных зданиях – Европейский стандарт EN 13773 (классификация по EN 13501-1: B-s1, d0 означает минимальное тепловыделение, отсутствие горящих капель и низкое дымообразование); в России это требования технического регламента Таможенного союза ТР ТС 043/2017 «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения». Но

наиболее научно обоснованным является метод конусной калориметрии (ISO 5660), который дает распределение во времени скорости тепловыделения (HRR), общее тепловыделение (THR), время воспламенения и дымообразование. Для синтетических тканей важнейший параметр – «максимальная скорость тепловыделения» (peak HRR): необработанный полиэфир дает пик 300–400 кВт/м², а при эффективной огнезащите этот показатель должен быть снижен до 50–100 кВт/м². Сравнительные испытания показывают, что лучшие результаты достигаются при использовании многослойных систем: нанесение интумесцентного (вспучивающегося) покрытия, содержащего фосфор, меламин и пентаэритритол, поверх пропитки неорганическими наполнителями. При нагреве такое покрытие увеличивается в объеме в 20–30 раз, создавая толстый изолирующий слой, который препятствует тепломассопереносу [4].

Важнейшим направлением снижения пожарной опасности остается разработка так называемых «негорючих» синтетических волокон с предельным кислородным индексом выше 40–45 %, которые не поддерживают горение даже в атмосфере чистого кислорода при нормальном давлении. К таким материалам относятся ароматические полиамиды – мета- и пара-арамида (Nomex, Kevlar, Twaron), полибензимидазолы (ПБИ), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) и полифениленсульфид (ППС). Хотя формально они также синтетические, их пожарно-технические характеристики кардинально отличаются: арамида обугливаются без плавления, выделяя минимум дыма. Однако высокая стоимость (в 10–20 раз дороже ПЭТ) и технологическая сложность переработки ограничивают их применение специальной защитной одеждой для пожарных и нефтехимиков. Следовательно, для массового текстиля путь лежит не в замене полимера, а в создании эффективных огнезащитных композитов с использованием синергетических смесей антипиренов нового поколения – биооснованных (фитиновая кислота, хитозан-фосфатные комплексы) и интеллектуальных

систем, где антипирен высвобождается только при критическом нагреве, например, из капсул, разрушающихся при 200–250 °С. Современные исследования в области текстильной огнезащиты все чаще используют вычислительную химию для предсказания механизмов термодеструкции и машинное обучение для подбора оптимальных рецептов антипиренов без долгих циклов физического тестирования.

Таким образом, в перспективе устойчивого развития все более критичным становится требование к вторичной переработке огнезащищенных тканей. Присутствие большинства антипиренов делает рециклинг ПЭТ-бутылок или волокон крайне затруднительным: загрязнители либо деструктируют при высокотемпературной переработке, выделяя токсины, либо остаются в регрануляте, снижая его качество. Поэтому разрабатываются обратимые антипирены – например, на основе координационных полимеров, которые могут быть химически удалены из отходов мягкой экстракцией. В целом, снижение пожарной опасности синтетических текстильных материалов представляет собой динамично развивающуюся междисциплинарную область, где на кону стоят человеческие жизни, экономические потери от пожаров (оцениваемые в миллиарды долларов ежегодно) и экологический ущерб. Только комбинация методов – от реакторного синтеза новых мономеров до нанесения барьерных покрытий и интеллектуального термочувствительного текстиля – позволит в ближайшие десятилетия приблизить синтетику по пожарной безопасности к натуральным аналогам, сохранив ее уникальные эксплуатационные достоинства.

Библиографический список

1. Аксенов С.Г., Сайнашев М.Э. Анализ и оценка пожарной опасности мясоконсервного комбината // Экономика строительства. 2023. № 11. С. 86-88.
2. Аксенов С.Г., Ирниченко О.А. Обеспечения пожарной безопасности нефтяных и газовых скважин // Экономика строительства. 2023. № 7. С. 41-45.

3. Зубкова Н.С., Антонов Ю.С. Снижение горючести текстильных материалов: решение экологических и социально-экономических проблем // Российский химический журнал. 2002. №1. С. 96-102.

4. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. М.: Химия, 1980, 269 с.

5. Панова Л.Г., Артеменко С.Е., Бешапошникова В.И., Скребнева Л.Д. Высокомолек. соед. А, 1991, т. 33, № 6, с. 1180— 1185.