В будущем ожидается развитие гибридных металлических пен, например, на основе никелевых или титановых сплавов с нанопокрытиями, что позволит расширить их применение в условиях еще более высоких температур – до 1600–1800 °С. Уже сегодня ведутся исследования по созданию пен с градиентной пористостью, где внешний слой имеет пористость 90–95 % для теплоизоляции, а внутренний – 70–80 % для обеспечения механической прочности. Это открывает новые возможности для использования металлических пен в гиперзвуковых летательных аппаратах, ядерных реакторах и других высокотехнологичных областях.

Таким образом, металлические пены, особенно алюминиевые, представляют собой оптимальное решение для применения в экстремальных условиях машиностроения. Их уникальные свойства – низкая плотность (0,2–0,6 г/см³), высокая прочность при сжатии (до 50–100 МПа), термостойкость (до 1500 °С с покрытиями) и способность поглощать энергию – позволяют значительно улучшить характеристики конструкций. Например, замена стальных теплозащитных экранов на алюминиевые пены в ракетных двигателях позволяет снизить массу на 40–60 % при сохранении или даже улучшении теплозащитных свойств.

Литература

1. Шарма, Ш. Систематический обзор технологий производства металлической пены / Ш. Шарма, А. Йоши, Й. Раджпут // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 22–35. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25-4-22-35
2. Калиниченко, В. А. Вспененные пористые теплоизоляционные материалы на основе алюминия / В. А. Калиниченко, А. А. Андрушевич // Литье и металлургия. – 2012. – № 3 (66). – Спецвыпуск: пористые металлы и их применение. – С. 31–34.

ПРОБЛЕМА ПЕРЕРАБОТКИ ВУЛКАНИЗИРОВАННЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ И КОНЦЕПЦИЯ ПОЛНОСТЬЮ РЕЦИКЛИРУЕМЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

М. А. Горбачев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель А. Д. Левкина

Рассмотрена проблема переработки вулканизированных эластомеров на примере автомобильных шин. Необратимость химического сшивания делает традиционные методы утилизации (механический рециклинг, девулканизацию, сжигание) неэффективными: первый – снижает прочность, второй – дорог и сложен, третий – неэкологичен. Решение предлагается в изменении химической архитектуры материала. Внедрение динамических ковалентных адаптивных сетей (CANs) и обратимых сшивок (обмен дисульфидными связями, реакции Дильса–Альдера) позволит резине сохранять эксплуатационные свойства, но становиться пластичной при нагреве для повторной переработки. Также перспективна унификация полимерной основы, использование растворимых разделительных слоев и химическая деполимеризация. Сделан вывод, что создание полностью рециклируемой шины на основе термопластичных эластомеров переходит из области футурологии в инженерную плоскость.

Ключевые слова: вулканизация, шины, связи, материалы.

Вулканизированные эластомеры [1] – это полимерные материалы, в данном случае резина, подвергшиеся химическому сшиванию для улучшения прочности, эластичности и термостойкости. Основная проблема их переработки заключается в необратимости

вулканизации. К примеру, высокая сетевая структура препятствует плавлению и переработке традиционными методами термопластов. Разрушение сшитых связей требует химического или физико-химического воздействия, что сопровождается потерями механических свойств. Низкая экономическая и экологическая эффективность традиционных методов утилизации, т. е. путем сжигания и захоронении.

На сегодняшний день существует несколько основных подходов для переработки автомобильных шин [2]: механический рециклинг, девулканизация, энергетическая утилизация. Однако каждый из этих методов имеет значимые недостатки.

Механический рециклинг – шины измельчают в мелкую крошку. Эту крошку используют как наполнитель в асфальт, покрытия стадионов, как добавку в свежую резину и т. д. Проблема заключается в том, что при добавлении 5–10 % резиновой крошки в свежую смесь резко падают прочностные характеристики. Она не встраивается химически в новую вулканизационную сетку, что ведет к расслоению и снижению сцепления (доля переработанного материала, которую можно вернуть в производство новых шин, – 5–15 %). Эффективность переработки (выход полезной резиновой фракции) – 90–95 %.

Девулканизация – попытки частично разрушить серные связи без разрушения углеродной основы полимера. Проблема – технологии (термическая, ультразвуковая, химическая) сложны, энергозатратны и дороги. Достичь селективного разрыва именно серных мостиков, не повредив полимерную цепь, крайне трудно. В результате получается материал худшего качества (деструктат), который можно использовать только в менее ответственных изделиях (доля регенерата в смеси для новых шин без критической потери качества) составляет 15–25 %, а эффективность переработки (выход регенерата пригодного качества) – от 60 до 80 %.

Энергетическая утилизация [3] – так как шины обладают высокой теплотворной способностью, их сжигают в цементных печах или подвергают пиролизу. Проблема в том, что это неэкологично. При пиролизе теряются важные полимеры, получаем сажу, газ и жидкое масло сомнительной чистоты 0 %. Эффективность переработки (КПД извлечения тепловой энергии) составляет 70–85 %.

Чтобы шина стала полностью рециклируемой, необходимо пересмотреть ее химическую архитектуру. Основная цель – создать материал, который на протяжении всего жизненного цикла сохраняет эксплуатационные характеристики (безопасность, износостойкость), но на финальном этапе способен возвращаться в исходное мономерное состояние или легко перерабатываться без потери свойств.

Современная концепция базируется на трех способах: обратимая вулканизация, динамическое ковалентыне связи и проектирование с учетом разборки.

При рассмотрении способа «обратимые сшивки» вместо необратимых сульфидных мостиков (C–S–C) предлагается использовать динамические ковалентные адаптивные сети (CANs – Covalent Adaptable networks). Это соединения, которые ведут себя как термореактопласты (прочные, упругие) в условиях эксплуатации, но становятся пластичными при нагревании или определенном воздействии. Эффективность переработки: ~ 83 % (восстановление механических свойств). Возможность повторного использования: до 3–4 циклов. Можно выделить несколько основных типов реакций:

– обмен дисульфидными связями – использование полисульфидных олигомеров. При нагревании серные связи могут «обмениваться» партнерами, позволяя материалу течь: ~ 75,6 % (сохранение прочности). Возможность повторного использования средняя, так как есть риск образования побочной связи, такой как моносульфидная связь, при повторной вулканизации;

– борнокислые эфиры – использование обратимых реакций Дильса–Альдера. При повышенной температуре поперечные связи распадаются, полимер становится текучим и может быть переработан: 99 % (эффективность самовосстановления). Возможность повторного использования – до 3 циклов;

трансэтерификация – введение в резину гидроксильных групп и катализаторов, позволяющих перегруппировывать связи при нагреве: 88,3 % (сохранение прочности после переработки). Возможность повторного использования замкнутого цикла (Closed-Loop) с возможностью переработки – не менее 3 раз.

Современная шина – это композит из 10–20 различных материалов (разные типы каучуков, стальной корд, текстильный корд, техуглерод, силика, смолы). Разделить их механически невозможно. Концепция полностью рециклируемой шины предполагает:

– унификацию полимерной основы – использование одной базовой полимерной матрицы (например, полиизопрена или полибутадиена) для всех компонентов протектора, боковины и каркаса. Эта технология позволяет увеличить содержание переработанного материала в новой шинной смеси до 20 %;

– растворимые разделительные слои – введение специальных связующих слоев, которые при нагреве или воздействии растворителя теряют адгезию, позволяя легко отделить стальной корд от резины и текстиль от резины: можно достичь общей эффективности извлечения материалов до 98 %; процессы химического растворения в отличие от пиролиза могут проводиться при более низких температурах, что позволяет сохранить полимерную структуру и получать высокочистые продукты.

Вместо механического измельчения предлагается химическая деполимеризация – использование полярных эластомеров. Часть исследований фокусируется на переходе от неполярных углеводородов (натуральный каучук, бутадиен) к полярным полимерам (например, модифицированные полиуретаны или сложные полиэфиры), которые можно гидролизовать или аминолизовать обратно в мономеры.

Подводя итог, на сегодняшний день концепция полностью рециклируемой автомобильной шины переходит из разряда футурологии в инженерную плоскость. Решение лежит в области динамической химии ковалентных связей и проектирования с учетом конца жизненного цикла.

Наиболее перспективным направлением сегодня считается создание шин на основе термопластичных эластомеров нового поколения или резин с динамическими сульфидными связями, которые позволяют использовать методы переработки, схожие с термопластами (формование под давлением и экструзия), сохраняя при этом эластичность традиционных шин.

Литература

1. Патент РФ 2682347, МПК C08L 21/00, B60C 1/00. Вулканизированные эластомерные материалы для компонентов шин, содержащие модифицированные силикатные волокна, а также шины, выполненные из таких материалов : № 2018133297 : заявлено 11.09.2018 : опубл. 16.03.2019 / Джаннини Л., Лунги Д., Наха М. ; заявитель и патентообладатель Пиррелли Тайр С. П. А. – 16 с.
2. Долинская, Р. М. Рециклинг отходов резинотехнических изделий (обзор) / Р. М. Долинская, Н. Р. Прокопчук // Полимерные материалы и технологии. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 6–24.
3. Шиповалов, Д. А. Утилизация и переработка резинотехнических отходов от автотранспортных средств измельчением в крошку (обзорная статья) / Д. А. Шиповалов, И. В. Насакин // Студенческий научный форум – 2016 : материалы VIII Междунар. студен. науч. конф., 2016. – URL: https://scienceforum.ru/2016/article/2016023839 (дата обращения: 30.04.2025).