

Литература

1. Михайлов, М. И. Исследование геометрических параметров базовых граней сменных многогранных пластин / М. И. Михайлов, З. Я. Шабакаева // *Материалы, технологии, инструмент.* – 2006. – № 3. – С. 84–87.
2. Михайлов, М. И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М. И. Михайлов ; под ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 339 с.

УДК 699.81:678.073

**СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ПОЖАРООПАСНОСТИ
НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ В 3D-ТЕХНОЛОГИЯХ**

С. Н. Бобрышева

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

Показана возможность снижения пожароопасности полимерных материалов, получивших широкое распространение при изготовлении изделий с использованием 3D-технологий. Обоснован выбор неорганических антипиренов и показана их эффективность в составе полимеров. Для оценки горючести полимерных материалов применяется разработанный комплексный показатель, позволяющий найти количественные соотношения компонентов, связывающие качественные показатели пожарной опасности полимеров. Подобие принципов переработки полимеров традиционными литьевыми, экструзионными технологиями позволяет использовать полученные результаты и в FDM технологиях 3D-печати.

Ключевые слова: полимерные материалы, антипирены, 3D-технологии, горючесть, пожароопасность.

**A METHOD OF REDUCING THE MOST COMMON POLYMER
MATERIALS' FIRE HAZARD IN 3D TECHNOLOGIES**

S. N. Bobrusheva

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article focuses on polymer materials that have become widespread in manufacturing products by means of 3D technologies and the possibility of reducing their fire hazard. The choice of inorganic flame retardants is justified and their effectiveness in the composition of polymers is shown. In order to evaluate the combustibility of polymers, a developed complex indicator is used allowing to find quantitative components ratios that link qualitative indicators of polymer materials fire hazard. The similarity of the principles related to polymers recycling by traditional injection moulding and extrusion technologies allows the obtained results to be applied in FDM 3D printing technologies.

Keywords: polymer materials, flame retardants, 3D technologies, combustibility, fire hazard.

К настоящему времени наработан широкий ассортимент пластиков, перерабатываемых с использованием 3D-технологий в изделия различного назначения. Более 20 наименований выпускаются в виде филаментов и гранулятов. Стремительно развивается рынок композитов на их основе. Поэтому выбор подходящего материала не представляет никакой трудности.

Наиболее популярными, простыми и отработанными из аддитивных технологий, использующих эти полимеры, являются FDM (Fused Deposition Modeling) тех-

нологии 3D-печати. Тем не менее в процессе получения изделий необходимо учитывать пожароопасность используемых полимерных материалов. Полиэтилен, полилактид, АБС, полистирол являются горючими и будут оставаться горючими в силу своего происхождения. Однако горючесть можно снизить различными приемами. Один из таких приемов изложен в данной статье.

В исходном состоянии полимер находится в виде «стренг» (филамента, нити) или гранулята. Переработка материалов происходит в вязкопластичном, вязкотекучем состоянии, которое достигается при нагревании до температуры плавления. При этом выделяются газообразные продукты, способные воспламениться. Опасными факторами, сопровождающими как производство изделий из этих материалов, так и их эксплуатацию, являются не столько высокие температуры, сколько образование дыма и его токсичность. Существующие методы снижения горючести даже при высокой эффективности не являются универсальными, влияют на свойства материала либо являются источником токсичности уже другого рода. Вовлечение как традиционных полимерных материалов, так и появляющегося многообразия композитов специального назначения в новые технологии делает задачу снижения горючести этих материалов по-прежнему актуальной.

По мнению автора, доступным, прогнозируемым и относительно дешевым способом снижения горючести являлось бы применение неорганических антипиренов, реализующих в основном принцип разбавления горючего негорючим. Такие разработки существуют и новизна могла быть получена только в плане новых добавок – веществ. Однако работа в этом направлении выявила сопутствующие проблемы: совместимость полимера и добавки – антипирена; изменение свойств, прежде всего, реологических, что очень существенно влияет на технологический процесс переработки, а также механических свойств, однородность состава и структуры.

Основной задачей данного исследования являлась оптимизация состава, которая включала вариации соотношения «полимер – антипирен» для достижения максимального снижения горючести при сохранении (или, по крайней мере, не ухудшении) основных физико-химических, реологических, эксплуатационных свойств.

В работе исследовалась возможность применения в качестве антипиренов алюмосиликатов в виде таких минеральных ископаемых, как бентонитовые глины. К бентонитам относятся тонкодисперсные высокопластичные глины, основную роль в составе которых играет порообразующий минерал – монтмориллонит. Выбор был обусловлен несколькими факторами: высокие изначально дисперсность и поверхностная энергия вещества способствуют прививке функциональных групп, придающих ему необходимые свойства и совместимость с другими функциональными минералами: доступность, дешевизна, отсутствие токсичности и др.

Процесс получения антипирена включал следующие стадии:

- 1) диспергирование глины;
- 2) модифицирование;
- 3) сушку полученного порошка.

Одной из задач исследований явилось обеспечение совместимости полимера и антипирена. Так как полимер является гидрофобным, а антипирен гидрофильным, то для обеспечения их совместимости проводилось модифицирование антипирена различными гидрофобными составами (кремнийорганическими жидкостями, соапстоками жирных кислот и др.), совмещенное с диспергированием в планетарной мельнице. Результаты модифицирования показали не только достижение гидрофобности, но и увеличение дисперсности антипирена, что обусловлено поверхностно-

активным действием модификаторов. Экструзионные образцы полимеров (первичный и вторичный полиэтилен низкого давления) с разработанным антипиреном обладали однородной структурой, но необходимо отметить, что для обеспечения равномерности распределения антипирена в объеме полимера необходимо предварительное смешивание его с гранулятом или дозированное введение в расплав. Получение полимерных образцов традиционным способом – методом экструдирования на установке «Rheocord 90» фирмы «НААКЕ» (ФРГ) и дальнейшие испытания их механических свойств (INSTRON 5567) показали, что при введении эффективного количества антипирена (0,5–2 %) механические свойства улучшаются, что, видимо, обусловлено усиливающим действием дисперсной добавки [1].

Механизм снижения горючести такого рода антипиренами подробно не рассматривается в рамках данной публикации, а изложен в других работах автора [1, 2]. Данные материалы принято относить к инертным, т. е. они не оказывают существенного влияния на состав и количество продуктов пиролиза полимеров в газовой фазе и величину коксового остатка в условиях горения, однако они изменяют его теплофизические характеристики и условия тепло- и массообмена при горении (ультрачастицы антипирена являются физической преградой при распространении реакций горения).

Об эффективности разработанного антипирена судили по результатам испытаний на горючесть (приращению температуры и потере массы испытываемых образцов) с использованием стандартных методик при помощи прибора ОТМ, которые показали, что образец с добавками антипирена соответствует классу горючих трудновоспламеняемых материалов, в то время как без антипирена относился к классу горючих легковоспламеняемых материалов. Усиление действия антипиренов возможно при комплексном использовании их как матрицы для классических ингибиторов горения, применяющихся в составе огнетушащих порошков, например, аммофоса. Однако необходимо учитывать, что температура деструкции полимера, предшествующая воспламенению и горению, и температура антипирена должны быть близки.

Для оптимизации состава полимера с добавками антипирена с целью достижения максимального результата был разработан комплексный показатель горючести (КПГ), который включает параметры горения материала, которые по-разному меняют свои значения, отражая пожароопасность материала в целом. КПГ может быть применен при разработке новых антипиренов аналогичного механизма действия [2].

Аддитивная технология 3D-печати FDM основана на принципах традиционных литьевой и экструзионной технологий. Чаще всего материал в виде филамента (стренг, прутков, нити) или гранулята подается в нагревательный элемент, где доводится до вязкотекучего состояния и далее через сопло слоями выдавливается на подогреваемую платформу, повторяя форму изделия в соответствии с разработанной САД-моделью. Как в традиционных, так и в 3D-технологиях, в процессе нагревания макромолекулы полимеров легко распадаются на низкомолекулярные насыщенные и ненасыщенные углеводороды, которые вступают в экзотермические реакции окисления. Поэтому разработки антипиренов для полимеров, перерабатываемых экструзией и литьем под давлением, легко адаптировать для аддитивных технологий. Применяя FDM аддитивную технологию 3D-печати, необходимо учесть влияние добавок антипирена на реологические свойства полимера, адгезию слоев, усадку, изменение цвета. Результаты, полученные при исследовании образцов полимера с антипиреном, полученных экструзией, позволяют с большой долей достоверности прогнозировать снижение горючести, повышение прочности изделий и уменьшение усадки при применении FDM технологии.

Литература

1. Антипирены для строительных полимерных материалов / Д. Л. Подобед [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 5–10.
2. Бобрышева, С. Н. Применение метода дисперсионного анализа однофакторной математической модели для оптимизации состава полимеров с пониженной горючестью / С. Н. Бобрышева, Л. И. Буякевич, Д. Л. Подобед // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2019. – № 3. – С. 45–51.

УДК 621.225.7

**ПРИКЛАДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОСИСТЕМЫ
С КЛАПАННОЙ АДАПТАЦИЕЙ К НАГРУЗКЕ**

Е. В. Хазеев, Д. Л. Стасенко

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

Рассмотрены вопросы построения прикладного моделирования гидравлических систем с клапанной адаптацией к нагрузке при помощи программного пакета «AmeSim». Определено, что для прикладного моделирования с полным анализом работы гидросистемы с клапанной адаптацией к нагрузке рационально применять данный программный пакет.

Ключевые слова: гидравлическая система, клапанная адаптация к нагрузке, прикладное моделирование.

**APPLIED MODELING OF THE HYDRAULIC SYSTEM
WITH VALVE ADAPTATION TO LOAD**

Y. V. Khazeyeu, D. L. Stasenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In this paper, the issues of constructing applied modeling of hydraulic systems with valve adaptation to load using the "AmeSim" software package are considered. It is determined that it is rational to use this software package for applied modeling with a complete analysis of the operation of a hydraulic system with valve adaptation to load.

Keywords: hydraulic system, valve adaptation to load, applied modeling.

В настоящее время во многих мобильных машинах при работе используются гидравлические системы, работающие по принципу клапанной адаптации к нагрузке, в которых источником питания служит нерегулируемый насос. Данный тип гидравлических систем можно считать относительно простым, надежным и экономически эффективным [1].

Исследования, направленные на построение математических моделей данных систем, являются важнейшей задачей для получения точных значений параметров работы системы. В связи с этим выбор типа моделирования становится актуальной задачей. Построение математических моделей при помощи теоретического моделирования требует большого количества времени на проведение исследований, в то время как при использовании имитационного моделирования можно упростить решение задач регулирования, управления, статики, динамики, исходя из единых методических позиций гидравлических систем и объединить все исследования в одно ядро расчетного комплекса [2].