

УДК 544.2::621.798

А. Н. КОЛОСКОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розглядається побудова моделі багат шарового комбінованого матеріалу що використовується в пакувальній промисловості. Для оцінки міцності з'єднань між шарами побудована удосконалена узагальнена класифікація існуючих матеріалів за способом з'єднань. Розглянуто методи та матеріали що застосовуються для створення багат шарових комбінованих матеріалів. Вперше побудована механічна модель полімерної молекули, на основі якої описана модель міжшарових з'єднань. Результати дослідження можуть бути використані для розрахунків міцності багат шарових комбінованих матеріалів та їх з'єднань.

Ключові слова: багат шарові плівки, комбіновані матеріали, міцність упаковки, полімерні матеріали, механічна модель

Рассматривается построение модели многослойного комбинированного материала используемого в упаковочной промышленности. Для оценки прочности соединений между слоями построена усовершенствованная обобщенная классификация существующих материалов по способу соединений. Рассмотрены методы и материалы применяемые для создания многослойных комбинированных материалов. Впервые построена механическая модель полимерной молекулы, на основе которой описана модель межслойных соединений. Результаты исследования могут быть использованы для расчетов прочности многослойных комбинированных материалов и их соединений.

Ключевые слова: многослойные пленки, комбинированные материалы, прочность упаковки, полимерные материалы, механическая модель

The problems connected to strength of multi-layer combined materials used in packaging industry are investigated. It is found that in such materials polymeric layers may function in multi-layer combinations both as main and binding material. Results. The main result of the investigation is in development of the layers joining model of multi-layer combined materials. The developed model of polymeric molecule is put in the basis of the layers adjoining model. Classification of multi-layer combined materials is built using materials and ways of their adjoining as classification principles. Originality. Classification of multi-layer combined materials is improved by using ways of materials connection as classification principle. For the first time the mechanical model of polymeric molecule is developed. For the first time it is proposed to define the strength of layers adjoining using calculation method instead of destructive experimental way. These calculations are to be based on intermolecular interaction mechanical modelling instead of materials adhesion. Practical value. Developed classification, model and approach based on them may be used for evaluation of layers adjoining strength in multi-layer combined materials. They may also be used for evaluation of strength of materials tension same as for their welding joints calculations.

Keywords: multi-layer films, combined materials, packaging strength, polymeric materials, mechanical model

Введение. Первое, на что обращает внимание покупатель, заходя в магазин, – это упаковка. Однако, помимо внешней привлекательности, упаковка должна обеспечить сохранность продукта, защитить его от внешних воздействий. Однослойные полимерные пленки, бумага или алюминиевая фольга в отдельности по различным причинам не могут быть использованы для упаковывания многих видов продукции. Поэтому проблема упаковывания продукции решается путем использования многослойных комбинированных материалов. Комбинация слоев дает возможность получить упаковочный материал с заданным комплексом свойств. В наше время 95 % упаковки, представленной на прилавках магазинов, выполнено из комбинированных материалов и она с успехом конкурирует с той же традиционной тарой из картона.

В то же время, на сегодняшний день наиболее часто применяемым методом определения прочности упаковки из комбинированного материала является испытание образцов на разрушение под нагрузкой в лабораторных условиях с последующим контролем промышленных изделий [1]. Несмотря на то, что этот метод позволяет получить много различных данных, которые пригодны для оценки разрушения, актуальной является проблема определения прочности комбинированных материалов и их соединений расчетным путем с целью повышения их эксплуатационных свойств.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В упаковочной промышленности используется огромное количество видов комбинированных материалов, наиболее широко изученными из которых являются полимерные композиции. К примеру, в работах [2–5] проведен достаточно глубокий обзор

гибких комбинированных материалов, созданных на основе полимерных композиций, описаны их структура, методы производства и области применения. Однако, если вести речь о многослойных, композиционных, комбинированных материалах, то помимо полимеров в них могут использоваться также и другие составляющие. Чаще всего это фольга и бумага [2]. Существуют различные виды классификаций упаковочной бумаги и стандарты на изготовления фольги [6], но при этом полностью отсутствуют попытки структурировать и единообразно классифицировать виды комбинированных материалов.

Создание и расчет свойств таких материалов представляют важную научно-техническую задачу и требуют анализа в каждом конкретном случае, поскольку приходится принимать во внимание множество переменных величин (материалы, толщина отдельных слоев, структура многослойного материала, способ его переработки и т. д.). Такие материалы могут характеризоваться спектром свойств, которым не обладал ни один из слоев в отдельности.

В первом приближении считают, что свойства таких материалов определяются либо по правилу смесей, либо при большом различии свойств параметрами компонента (слоя), имеющего экстремальные характеристики. Однако для точного расчета комбинации необходимо учитывать явления на границе раздела фаз, которые оказывают очень существенное влияние, особенно на деформационные и прочностные показатели.

Прочность комбинированных материалов практически всегда оценивается порядком установления слоев и обеспечением необходимого уровня адгезии-

© А. Н. Колоскова. 2016

онного взаимодействия между ними [7]. Однако работа адгезии не всегда соответствует адгезионной прочности соединения, поэтому для комбинированных материалов проверка адгезионной прочности носит по большей степени экспериментальный характер.

В работе [8] проведено исследование адгезионной прочности методом инфракрасной спектроскопии показано, что одним из существенных факторов, определяющих свойства покрытий, является взаимосвязь между прочностью адгезионного взаимодействия и распределением химических связей в системе полимер-волокно. Отмечено, что величина адгезии зависит не только от наличия, но и от числа связей между контактирующими телами. Для органических и неорганических веществ подтверждено образование химических связей между адгезивом и субстратом.

Борисовым С.А. в работе [9] было исследовано адгезионную прочность в зависимости от шероховатости бумаги. Показано, что чем меньше шероховатость бумаги, тем выше адгезионная прочность соединения.

Таким образом, для решения задачи прочности, основной проблемой является построение такой модели соединения слоев материала, которая позволила бы оценить прочность материала методами неразрушающего контроля.

Цель работы и задачи исследования. Целью данной работы является повышение эксплуатационных свойств комбинированных упаковочных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать единую классификацию многослойных комбинированных упаковочных материалов
2. Разработать модель соединения между слоями в многослойном комбинированном упаковочном материале

Материалы исследования многослойных комбинированных упаковочных материалов. Следует заметить, что ни один из слоев комбинированного материала в отдельности не имеет такого комплекса свойств, который бы удовлетворил все требования при упаковывании любой продукции. Именно это обстоятельство стало основой для проведения исследований по созданию многослойных пленок. Для достижения необходимых свойств многослойных упаковочных материалов одни компоненты стали не просто комбинировать, а присоединять к другим.

Объектом исследования стали многослойные комбинированные упаковочные материалы.

Предметом исследования являются способы соединения слоев в многослойных комбинированных материалах применяемых в упаковочной промышленности.

Классификация многослойных комбинированных упаковочных материалов. Приведенная обобщенная классификация основывается на материалах и способах их соединения. Каждый из ее элементов может быть проклассифицирован по количеству слоев, порядку их чередования, а также технологиях, применяемых для их изготовления. Согласно указанным признакам было выделено четыре группы материалов.

1. Многослойные полимерные пленки – пленки, получаемые из двух и более слоев полимерных материалов. Могут быть получены методами раздувной, плоскощелевой и плоскощелевой каландровой экструзии [2]. В качестве материалов, используемых для изготовления таких пленок, чаще всего применяются различные виды полиэтиленов, полипропиленов, полиамиды и их сополимеры [4].

2. Металлизированные полимерные пленки – пленки, получаемые из двух и более слоев, один из которых выполнен из металла методом напыления. Толщина напыленного слоя металла составляет до $3 \cdot 10^{-7}$ м. Для металлизации используются такие цветные металлы, как алюминий, медь, никель, хром. Металлизация проводится в вакууме при высокой температуре: для алюминия, к примеру, эта температур составляет порядка 1500°C , при которой используемая алюминиевая проволока испаряется, а образующиеся пары металла осаждаются в зоне вакуума на поверхности пленки или бумаги. Из пленок металлизуют полипропилен, полиамид, полиэтилен, полиэтилентерефталат, сополимеры этих полимеров и многослойные полимерные пленки.

3. Ламинированный металл и бумага – материал, состоящий из двух и более слоев. В зависимости от жесткости металлического или бумажного слоя различают гибкие материалы и жесткие материалы. Гибкие материалы получают при использовании бумаги толщиной до 0,3 мм и мягкой металлической фольги толщиной до 50 мкм. Для получения жестких используется картон толщиной свыше 0,3 мм и металлическую фольгу толщиной свыше 50 мкм [10]. Для создания подобных комбинированных многослойных материалов применяют методы каширования – нанесения и закрепления на непрозрачный материал пленки с использованием клевого соединения или припрессовки двух поверхностей – либо ламинирования – покрытия основы расплавленным полимером [10].

4. Комбинированный материал – многослойный материал, состоящий из трех слоев и более. В таком материале бумага прочно соединена склеиванием, «припрессовкой» или иными способами с полимерными пленками и фольгой, а также другими материалами с различным сочетанием слоев.

Для того, чтобы реализовать возможность увеличения прочности полимерных материалов за счет создания комбинированных систем, необходимо возможно полнее разобраться в причинах увеличения прочности. Анализ приведенной классификации многослойных комбинированных материалов показал, что существование таких материалов стало возможным только благодаря наличию в них полимерных слоев. С этой точки зрения особый интерес представляют комбинированные пленочные материалы. Во-первых, это одна из наиболее простых в отношении распределения напряжений в материале систем, являющаяся в некотором роде моделью для теоретических расчетов и их проверки. Во-вторых, прозрачность и оптическая активность ряда пленок позволяют наглядно изучать процесс разрушения комбинированных материалов и находить пути увеличения их прочности.

Модель соединения между слоями в многослойном комбинированном упаковочном материале. Полимер, входящий в структуру многослойного комбинированного материала, может находиться в двух состояниях: ориентированном и неориентированном. В ориентированном состоянии молекулы полимера имеют линейную структуру, неориентированный же полимер имеет молекулы в виде глобул. Однако, независимо от формы полимерной молекулы механизм разрушения полимера при растяжении сводится к разрушению вытянутых линейных макромолекул [11], при этом все сложные формы молекул получаются путем изменения ее линейной структуры под действием различных факторов.

С учетом изложенного выше при построении модели соединения между слоями наибольший интерес представляет построение механической модели молекулы линейной структуры.

За основу была взята модель Драйдинга, при которой строго соблюдаются внутримолекулярные расстояния, но не учитываются относительные размеры отдельных атомов, т.е. заполненность внутримолекулярного пространства. Используя метод аналогий [12], можно отметить подобность модели Драйдинга стержневой системе. Следовательно, в основу построения модели может быть положен механический подход, основанный на представлении полимерной молекулы как механизма, реализовывающего процессы, происходящие при деформировании и разрушении полимерной молекулы.

Поскольку полипропилен является одним из самых используемых в упаковочной промышленности и одним из самых изученных полимерных материалов, то построение механической системы было решено проводить на основе его молекулы.

Полипропилен является карбоцепным разветвленным полимером, то есть его цепь состоит из атомов углерода, к которой присоединены метильные группы CH_3 и водород. Длины химических связей углеродной $\text{C}-\text{C}$ и углерод-водородной $\text{C}-\text{H}$ имеют постоянную длину, а потому в модели их можно представить в виде звеньев-стержней постоянной длины.

Реальная полимерная цепь не является свободносочлененной, ее звенья ограничены в движении. Эти ограничения связаны с химическим строением молекулы, а именно с наличием валентных углов γ между звеньями. Таким образом, атомы углерода в цепи полипропилена расположены зигзагообразно. Угол между соседними химическими связями ни при каких условиях и воздействиях на молекулу не может быть заметно изменен без ее разрушения.

Поскольку при разрушении материала рассматривается линейная структура молекулы, работающей на растяжение, то нагрузка в этом случае будет восприниматься углеродным скелетом, и на данном этапе построения модели наличием боковых метильных групп и атомами водорода можно пренебречь.

Постоянство валентных углов не означает, что углеродный скелет молекулы является жестким, и что его конфигурация в дальнейшем не может быть изменена. В общем случае полимерная цепь вообще не имеет какой-либо определенной формы – она непрерывно изменяется под воздействием случайных

факторов, каковым является, в первую очередь, тепловое движение звеньев. На любой фазе этого движения валентный угол не может изменяться.

Для обеспечения вращения всех звеньев при построении механической модели места соединения всех звеньев (расположения атомов в модели Драйдинга) были представлены в виде шарниров с тремя степенями свободы (рис. 1).



Рис. 1 – Стержневая модель молекулы полимера

Поскольку межатомные расстояния и валентные углы имеют постоянные значения, и их изменение влечёт за собой разрушение молекулы, то в дальнейшем модель может быть представлена как рамная конструкция (рис. 2), состоящая из трехэлементных звеньев.

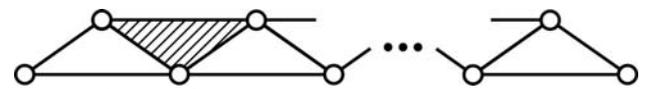


Рис. 2 – Рамная модель молекулы полимера

Каждое такое звено способно совершать только вращательное движение относительно осей, проходящих через соседние звеньями элементами. Таким образом, можно провести эквивалентное преобразование, заменив трехэлементные звенья системой вращательных кинематических пар (рис. 3).



Рис. 3 – Механическая линейная модель молекулы полимера

Длина каждого элемента может быть определена, как средняя линия треугольника, образованного при построении трехэлементной рамной конструкции.

Существует две разновидности соединений слоёв материала. Первая – когда молекулы вещества проникают друг в друга, такое соединение характерно для сочетания двух полимерных слоев, произведенных методом экструзии. Вторая – соответствует сочетанию полимерного материала с фольгой или бумагой, при этом соединение происходит за счет сил адгезии между слоями. И в первом и во втором случае межслойное разрушение будет происходить за счет разрыва межмолекулярных связей. Это было учтено при построении нашей модели следующим образом.

Одним из основных правил построения механизма является правильное его закрепление. Для рассматриваемого случая – разрушение линейной полимерной молекулы при растяжении – произведено крепление только конечных звеньев, одно из которых зафиксировано на шарнирно неподвижной опоре (рис. 3).

Построение механизма крепления второго конечного звена должно учитывать разрушение межмолекулярных связей, разрыв двух молекул. От величины сил межмолекулярного взаимодействия зависят многие характеристики полимера – вязкость расплава,

растворимость, совместимость с другими полимерами и пластификаторами, механические и диэлектрические свойства, плотность упаковки и т. д. Поэтому второе концевое звено было шарнирно закреплено на ползуне преодолевающим при движении силу трения (рис. 3), величина силы трения будет прямо пропорциональна силе межмолекулярных связей.

Результаты исследования многослойных комбинированных упаковочных материалов. Результатом работы является построение модели соединения слоев таких материалов. В основу модели положена механическая модель молекулы полимера, который может выполнять функции как основного материала, так и являться связующим при создании многослойных комбинаций. Составлена классификация многослойных комбинированных материалов, использующая в качестве классификационных признаков материалы и способы их соединения, что позволило определить место полимера в многослойной композиции.

В качестве научной новизны впервые предложено определить прочность соединения слоев не экспериментальным, а теоретическим путем, основываясь не на адгезии материалов, а на межмолекулярном взаимодействии, рассматривая его как механическую систему.

Обсуждение результатов исследования многослойных комбинированных упаковочных материалов. С использованием полученных результатов модель межслойного соединения в многослойном комбинированном материале может быть представлена в виде комбинации механических моделей молекул полимера, имеющих внешние соединения. Предложенный механический подход к моделированию структуры и поведения полимерной молекулы под действием внешнего нагружения, а также модель, сформированная на его основе, позволяют нам анализировать прочность полимерной молекулы в многослойном комбинированном материале аналогично прочности стержневого механизма, используя все допущения и ограничения, применяемые для расчета механических систем: упругость, сплошность, однородность материала; линейная деформируемость системы; малость перемещений. Расчеты для такого механизма могут производиться по общепринятым формулам строительной механики.

В дальнейших исследованиях необходимым представляется формализация соответствующих зависимостей и их экспериментальная отработка с целью проверки применимости представленных моделей для решения задач определения прочностных свойств полимерных материалов.

Выводы. Впервые, основываясь на анализе способов соединения слоев, была составлена обобщенная классификация многослойных комбинированных материалов, используемых в упаковочной промышленности. Предложенная классификация позволила обозначить место полимера в многослойной композиции.

Предложен механический подход к моделированию структуры и поведения полимерной молекулы под действием внешнего нагружения, а также модель, сформированная на его основе, что позволят анализировать прочность полимерной молекулы аналогично

прочности стержневого механизма, используя все допущения и ограничения, применяемые для расчета механических систем.

Описан метод построения механической модели соединения слоев многослойного комбинированного материала, что в дальнейшем позволит определять прочность соединения слоев без его разрушения – расчетным путем рассматривая соединение как механическую систему, основываясь не на адгезии материалов, а на межмолекулярном взаимодействии.

Список литературы:

1. Шипинский, В. Г. Упаковка и средства пакетирования [Текст] / В. Г. Шипинский. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 416 с.
2. Шредер, В. Л. Многослойные пленки, барьерность ... и многое другое [Текст] / В. Л. Шредер, В. Н. Кривошей // Упаковка. – 2014. – № 2. – С. 19–25.
3. Такахаси, Г. Пленки из полимеров [Текст] / Г. Такахаси. – Ленинград: Химия, 1971. – 152 с.
4. Бристон, Д. Х. Полимерные пленки [Текст] / Д. Х. Бристон, Л. Л. Катан. – Москва: Химия, 1993. – 381 с.
5. Шредер, В. Л. Упаковывание пищевых продуктов в гибкие материалы [Текст] / В. Л. Шредер, А. Н. Гавва, В. Н. Кривошей // Упаковка. – 2011. – № 1. – С. 38–43.
6. Хэнлон, Дж. Ф. Упаковка и тара: проетирование, технологии применения [Текст] / Дж. Ф. Хэнлон, Р. Дж. Келси, Х. Е. Форсинио. – Москва: Профессия, 2008. – 632 с.
7. Богданова, Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов [Текст] / Ю. Г. Богданова. – Москва: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 2010. – 68 с.
8. Борисова, А. С. Оценка адгезионной прочности комбинированных материалов на установке Micro Scratch Tester [Текст] / А. С. Борисова, Л. Г. Варепо // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (97). – С. 227–230.
9. Пасечник, М. В. Исследование адгезионного взаимодействия полимерных композиций с поверхностью текстильного материала [Текст] / М. В. Пасечник // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/6 (70). – С. 18–22. doi:10.15587/1729-4061.2014.26237
10. Мальков, С. Барьерное ламинирование [Текст] / С. Мальков // Пластикс. – 2011. – № 5 (99). – С. 58–61.
11. Зуев, В. В. Физика и химия полимеров [Текст] / В. В. Зуев, М. В. Успенская, А. О. Олехнович. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2010. – 45 с.
12. Батороев, К. Б. Аналогии и модели в познании [Текст] / К. Б. Батороев. – Новосибирск: Наука, 1981. – 320 с.

Bibliography (transliterated):

1. Shpinskiy, V. G. (2004). Upakovka i sredstva paketirovaniya. Minsk: UP «Tekhnoprint», 416.
2. Shreder, V. L. (2014). Mnogosloynnye plenki, bar'yernost' ...i mnogoye drugoye. Upakovka, 2, 19–25.
3. Takakhasi, G. (1971). Plenki iz polimerov. Leningrad: Khimiya, 152.
4. Briston, K. H., Katan, L. L. (1993). Polimernyye plenki. Moskva: Khimiya, 381.
5. Shreder, V. L., Gavva, A. N., Krivoshej, V. N. (2011). Upakovyvaniye pishchevykh produktov v gibkiye materialy. Upakovka, 1, 38–41.
6. Khenlon, J. F., Kelsi, R. J., Forsinio, Kh. Ye. (2006). Upakovka i tara: proyetrovaniye, tekhnologi primenenie. Moskva: Professiya, 632.
7. Bogdanova, Ju. G. (2010). Adgeziya i jeje rol' v obespechenii prochnosti polimernykh kompozitov. Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy universitet imeni M. V. Lomonosova, 68.
8. Borisova, A. S., Varepo, L. G. (2011). Otsenka adgezionnoy prochnosti kombinirovannykh materialov na ustanovke Micro Scratch Tester. Omskii nauchnyi vestnik, 1 (97), 227–230.
9. Pasechnik, M. V. (2014). Studying the adhesive interaction between polymer composites and textile material surface. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(6(70)), 18–23. doi:10.15587/1729-4061.2014.26237
10. Mal'kov, S. (2011). Bar'yernoje laminirovaniye. Plastik, 5 (99), 58–61.

11. Zuyev, V. V., Uspenskaya, M. V., Olekhovich, A. O. (2010). Fizika i khimiya polimerov. Sankt-Peterburg: SPbGU ITMO, 45.
12. Batoroyev, K. B. (1981). Analogii i modeli v poznanii. Novosibirsk: Nauka, 320.

Поступила (received) 15.01.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделирование полимерных шарів багатошарових комбінованих пакувальних матеріалів/ Г. М. Колоскова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.16–20. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Моделирование полимерных слоев многослойных комбинированных упаковочных материалов/ А. Н. Колоскова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 4(1176). – С.16–20. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Modelling of polymeric layers of multi-layer combined packaging materials / G. Koloskova//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 4 (1176) .– P. 16–20. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Колоскова Ганна Миколаївна – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем; вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна 61070; тел.: 050-160-56-22; e-mail: sceperich@mail.ru.

Колоскова Анна Николаевна – кандидат технических наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем; ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина 61070; тел.: 050-160-56-22; e-mail: sceperich@mail.ru.

Koloskova Ganna – candidate of technical science, associate professor, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”; Chkalova str., 17, Kharkov, Ukraine 61070; tel.: 050-160-56-22; e-mail: sceperich@mail.ru.