

Разработка и применение математических моделей для управления качеством термоусадочных полимерных материалов в инновационных производствах

А. М. Аразтаганова

Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет)
alinaami@mail.ru

Т. Б. Чистякова

Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет)
chistb@mail.ru

Аннотация. Введение инновационного оборудования, технологий и материалов, в том числе с применением нанотехнологий, расширение ассортимента полимерными материалами с широким спектром потребительских свойств позволяют отнести современные производства полимерных материалов к инновационным. Для управления такими производствами применяются передовые цифровые технологии: обработка больших объёмов данных, прогноз характеристик и управление процессами с применением математических моделей. Предлагается программный комплекс, включающий библиотеку математических моделей, настраиваемых на различные конфигурации производственного оборудования, типы материалов и термоусадочные свойства полимерных материалов. Базы данных программного комплекса содержат конфигурации производственных линий, характеристики материалов, технологические регламенты производства и коэффициенты математических моделей. Модуль визуализации комплекса позволяет отображать тренды изменения термоусадочных свойств, рассчитанных по математическим моделям, и вызвавших их управляющих воздействий, прогнозирования их значений по текущим значениям режимных параметров, а также тренды отклонения значений от заданных. В составе комплекса присутствует модуль для исследования зависимости термоусадочных характеристик от управляющих воздействий. Тестирование комплекса и математических моделей по данным инновационных промышленных производств России и Германии для широких диапазонов требований по качеству плёнок показало их точность и адекватность. Программный комплекс и реализованные математические модели могут быть применены для управления и перенастройки современных производств полимерных материалов, таким образом позволяя внедрять цифровые технологии для управления инновационными производствами.

Ключевые слова: инновационное производство; моделирование; управление; математические модели; программный комплекс

I. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования и моделирования выступают инновационные производства термоусадочных полимерных материалов. Объём производств термоусадочных полимерных материалов составляет сотни тысяч тонн в год. К основным характеристикам таких производств относят следующие:

- непрерывность производства;
- использование различных конфигураций оборудования: каландровых и экструзионных линий, включающих множество валков (от 20 до 200);
- использованием сырьевых материалов с различными свойствами (в том числе наноматериалов);
- широким диапазоном требований по качеству в условиях необходимости их взаимного сочетания (цвета, толщины, термоусадочных свойств и других);
- частой перенастройкой на новые требования по качеству [1].

Термоусадочные свойства полимерных плёнок описываются следующими показателями: величина продольной и поперечной усадки (мера изменения размеров изделия) и сила усадки – величина, характеризующая скорость изменения размеров изделия.

Следовательно, необходимо применение таких программных средств и математических моделей, которые позволят решать задачу управления гибкими многоассортиментными производствами с широким диапазоном требований к качеству продукции [2–3].

Поэтому актуальна разработка математических моделей, позволяющих управлять процессами получения термоусадочных полимерных плёнок на производственных линиях множества конфигураций, из различных типов

материалов в условиях широких диапазонов предъявляемых требований.

II. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ТЕРМОУСАДОЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Процесс получения термоусадочных полимерных материалов как объект исследования и управления представляется в следующем виде (рис. 1).

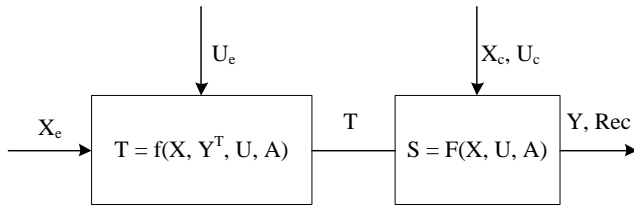


Рис. 1. Формализованное описание процессов получения термоусадочных материалов как объекта исследования и управления

Входными параметрами объекта исследования X_e являются конфигурация исследовательской линии и параметры материала и теплоносителя. Управляющие параметры U – скорость расходования теплоносителя и его температура, а также требования по качеству полимерных материалов. Выходными параметрами объекта исследования являются эталонные температурные кривые, позволяющие выпускать полимерные материалы с требуемыми значениями термоусадочных свойств Y^T , которые подаются в качестве задания в объект управления. Входными воздействиями X_c объекта управления являются конфигурация производственной линии, характеристики материала и требования по качеству. К управляющим воздействиям относятся скорости вращения и температуры валков производственной линии. На выходе объекта управления – значения термоусадочных свойств и рекомендации по управлению.

Задача управления процессами получения термоусадочных полимерных материалов с заданными значениями характеристик качества делится на задачу оптимального управления и задачу управления в нештатных ситуациях.

Задача оптимального управления процессами получения термоусадочных полимерных материалов формулируется следующим образом. Для заданных конфигурации производственной линии K , типа материала M и заданным значениям термоусадочных характеристик Y^T , с применением математической модели $Y_j = F_j(X, U, A_j)$, $j = 1, \dots, N$, определить значения управляющих воздействий $U = \{V_i^{opt}, T\}$, $i = 1, \dots, N_d$, в регламентных ограничениях $V_i^{min} \leq V_i^{opt} \leq V_i^{max}$, $T_{ht}^{min} \leq T_{ht}^{opt} \leq T_{ht}^{max}$, $G_{ht}^{min} \leq G_{ht}^{opt} \leq G_{ht}^{max}$ для поддержания значений термоусадочных свойств в заданных диапазонах, где N_m – количество моделей в библиотеке; $A_j = \{A_j^{str}, A_j^{sol}\}$ – параметры модели; A_j^{str} – коэффициенты уравнений модели; A_j^{sol} – параметры метода решения модели; V_i^{opt} – оптимальное значение скорости валков i -привода

каландровой линии; V_i^{min} – минимально допустимое значение скорости валков i -го привода каландровой линии; V_i^{max} – максимально допустимое значение скорости валков i -го привода каландровой линии; T_{ht}^{opt} – оптимальное значение температуры хладагента или теплоносителя; T_{ht}^{min} – минимально допустимое значение температуры хладагента или теплоносителя; T_{ht}^{max} – максимально допустимое значение температуры хладагента или теплоносителя; G_{ht}^{opt} – оптимальное значение расхода хладагента или теплоносителя; G_{ht}^{min} – минимально допустимое значение расхода хладагента или теплоносителя; G_{ht}^{max} – максимально допустимое значение расхода хладагента или теплоносителя; N_d – количество приводов каландровой линии; $Y_i = \{S_\Sigma, P_\Sigma\}$ – заданные величины термоусадочных характеристик полимерных пленок; S_Σ – величина усадки; P_Σ – сила усадки [4].

Задача управления в нештатной ситуации формулируется следующим образом. Для заданных конфигурации производственной линии K , типа материала M и отклонению значений термоусадочных свойств от заданного значения Y^T , определить нештатную ситуацию и выдать рекомендации Rec по её устранению.

III. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕРМОУСАДОЧНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработана библиотека математических моделей, позволяющая для заданной конфигурации производственной линии K и типа материала M рассчитывать термоусадочные свойства полимерных материалов, произведенных на этой линии [4]. За счет подбора структуры модели и настройки их коэффициентов математические модели могут быть применены для расчета величины усадки полимерных материалов, произведенных на линиях различных конфигураций из различных материалов.

IV. ОПИСАНИЕ БИБЛИОТЕКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Для управления современными производствами полимерных материалов необходима математическая модель, позволяющая вычислять величину термоусадочных свойств, учитывая конфигурацию производственной линии, характеристики полимерного материала и требования по качеству. Для решения задачи управления величиной усадки полимерных пленок были рассмотрены различные подходы к моделированию физических (реологических) характеристик пленок из полимерных композиций, а также подходы к моделированию физических свойств полимерных композиций при переработке [5].

В библиотеку математических моделей включена модель для расчёта геометрических характеристик производственной линии, таких как длины путей материала на различных участках линии, углы покрытия валков линии материалом и другие.

Библиотека математических моделей содержит модель для построения эталонных температурных кривых, используемых для производства полимерных материалов с

заданными термоусадочными свойствами. Построение кривых осуществляется за счёт обработки экспериментальных данных о зависимости термоусадочных свойств от температурного профиля. Испытания проводятся на исследовательской установке. Построенные кривые сохраняются в базе эталонных кривых для последующего использования.

Для расчёта термоусадочных свойств материалов в библиотеке представлены эмпирические и функциональные модели. Функциональные, или детерминированные, модели учитывают различные характеристики материалов: вязкие, упругие и вязко-упругие.

На основе массивов данных, полученных по результатам оценки качества выпущенных полимерных материалов построена эмпирическая модель для одной из линий. С использованием данной модели величина продольной усадки рассчитывается как $S_l = a_0 + a_1 \cdot H + (\sum_j(a_{2j} \cdot T_j) + (\sum_j(a_{3j} \cdot V_j)))$, величина поперечной усадки: $S_w = a_4 + a_5 \cdot H + (\sum_j(a_{6j} \cdot T_j) + (\sum_j(a_{7j} \cdot V_j)))$. Модель проста в разработке и подборе коэффициентов, но обладает узкой применимостью: тестирование показало её пригодность для расчёта термоусадочных свойств плёнок, производимых на линии из 27 валков, для которой модель было получена в узком диапазоне значений термоусадочных свойств (не более 10% для продольной усадки).

Эмпирические модели, обладая достаточно простым математическим аппаратом, наилучшим образом подходят для описания экспериментальных данных [1]. Однако применимость таких моделей ограничивается конфигурацией производственной линии и типом материала, для которых они были получены.

Применение моделей упругих тел для моделирования свойств полимерных материалов оправдано для тех из них, у которых ярко выражены упругие свойства и выражены слабо или совсем отсутствуют вязкие свойства. Как правило, такие модели инвариантны к конфигурации производственной линии, но чувствительны к типу, а, следовательно, и характеристикам материала. В случае изменения рецептуры сырья может потребоваться пересчет значений коэффициентов модели. Достаточно широкий спектр материалов, обладающих упругими свойствами, и простота математического аппарата делают оправданным применение таких моделей [6]. Поскольку, в таких моделях учтены все управляющие воздействия, применяемые на реальных производствах, такие модели наиболее приемлемы для управления величиной термоусадочных свойств полимерных материалов, их удобно использовать для управления термоусадочными характеристиками плёнок, произведенных на линиях различных конфигураций. Модель позволяет рассчитать продольную усадку и силу усадки от входных и управляющих воздействий на каждом участке межвалкового пространства. Величина и сила усадки, накопленные на выходе материала с производственной линии, вычисляется как сумма соответствующих величин

на каждом участке межвалкового пространства производственной линии.

Величина усадки от входных и управляющих воздействий на каждом участке межвалкового пространства рассчитывается как сумма корней уравнения S_i Муни-Ривлина на каждом i -м участке между валками производственной линии:

$$a_2 \cdot S_i^6 + a_0 \cdot S_i^4 + \left(a_1 - a_2 - \frac{2^{n+1} \cdot V_{i-1}}{L_i^{air} \cdot (n-1)} \cdot \left(1 - \frac{V_{i-1}}{V_i} \right)^{1-n} \cdot \mu \right) \cdot S_i^3 - a_0 \cdot S_i^2 + a_2 = 0$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты математической модели; n – индекс течения полимера; $\mu = \mu_0 \cdot e^{-b(T_r - T_i)}$ – вязкость полимера, Па·с; μ_0 – коэффициент консистенции, Па·с ^{n} ; b – температурный коэффициент, 1/°C; T_r – характерная температура полимера, °C [6].

Модель применяется для управления термоусадочными свойствами ПВХ плёнок, со степенью продольной усадки не более 10%, произведенных на линии, включающей не более 30 валков.

Наиболее полными являются модели, учитывающие как упругие, так и вязкие свойства материала, а также влияние интенсивности деформирования на закладываемые в материал деформации [6]. Как правило, такие модели могут быть применены к любому типу материала, обрабатываемого на производственной линии любой требуемой конфигурации при условии определения всех значений требуемых характеристик материала. Однако математический аппарат таких моделей зачастую оказывается крайне сложным за счёт того, что необходимо подбирать начальные приближения для корней уравнения 3 и более степеней, а затем производить их вычисление с высокой точностью. Также применение модели требует знание множества характеристических свойств материала, которые могут быть получены только в результате сложных вискозиметрических экспериментов.

К данному классу моделей принадлежат модель на основе релаксационного спектра и трехзвенная реологическая модель.

По модели релаксационного спектра усадка рассчитывается как $S_\Sigma = (\alpha - 1) \cdot 100\%$, где α – относительное изменение размера пленки, рассчитываемое как корень уравнения $\alpha^3 - \alpha \cdot \sigma_N / G_0 = 0$ в случае двумерной

вытяжки или $\alpha = \sqrt{\frac{\sigma_N + \sqrt{\sigma_N^2 + 4 \cdot G_0^2}}{2 \cdot G_0}}$ в случае

одномерной вытяжки, где G_0 – модуль упругости материала; σ_N – сумма не успевших релаксировать напряжений, накопленных на каждом участке между валками производственной линии, рассчитываемых как

$$\sigma_i = 4\mu \cdot \left\{ \frac{2}{t_i} \cdot \left(1 - \frac{V_{i+1}}{V_i} \right) \right\}^n \cdot \frac{1}{t_i} \cdot \left(1 - \frac{V_{i+1}}{V_i} \right)$$

где t_i – время движения материала между валками производственной линии, с (если $V_i / V_{i+1} < 1$, и принимается равным 0 в противном случае [6]).

Тестирование модели релаксационного спектра показало её адекватность (отклонение от фактического результата не более, чем на 15%) для поливинилхлоридных материалов, производимых на линиях различных конфигураций (от 20 до 50 валков).

По трёхзвенной реологической модели усадка вычисляется как $S_\Sigma = \frac{\varepsilon_2}{1+\varepsilon}$, где ε_2 – высокоэластическая составляющая деформации, вычисляемая как корень уравнения

$$\varepsilon_2 + \frac{\mu \cdot \varepsilon_2}{G_0} - 3^{(n+1)/2} \cdot \frac{\mu \cdot \varepsilon_2}{G_0} \cdot |\varepsilon - \varepsilon_2| = 0,$$

$$\varepsilon = \hat{e} \cdot \frac{V_{i+1}}{V_i} \cdot t, \quad \hat{e} = \frac{|V_i - V_{i+1}|}{t_i}$$

где ε – нормальная деформация; \hat{e} – скорость логарифмической деформации.

Тестирование модели проводилось для поливинилхлоридных материалов со степенью усадки не более 10%, произведённых на линии, состоящей из 27 валков.

Как для трёхзвенной реологической, так и для модели релаксационного спектра требуется проведение трудоёмких экспериментов для определения свойств материалов [6].

Разработка такой библиотеки моделей, позволяет настраивать её на различные типы материалов и конфигурации оборудования.

V. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Для решения задачи управления величиной усадки разработаны интерфейсы оператора и администратора, а также программные модули, имитационного моделирования объекта управления [7].

Для программного комплекса разработаны следующие базы данных: база данных производственных линий и их конфигураций, база данных материалов и их свойств, база данных технологических регламентов, база математических моделей и их параметров, база данных эталонных кривых, а также база нештатных ситуаций, их причин и рекомендаций по устранению.

Пользователь, авторизованный в программном комплексе в роли администратора, имеет возможность редактировать базы данных и знаний комплекса. В базе данных содержится информация о производственных линиях, их структуре и характеристиках составляющих их

приводов и валков, материалах и их свойствах, математических моделях и их параметрах, рекомендациях по управлению качеством термоусадочных полимерных плёнок в нештатных ситуациях.

Для пользователей, которым отведена роль операторов, доступна возможность задания управляющих воздействий для получения полимерных материалов с заданными значениями термоусадочных свойств, а также получения рекомендаций по управлению.

Для выбранной конфигурации производственной линии рассчитываются её геометрические параметры. По заданным значениям входных параметров и требований по качеству осуществляется построение или поиск в базе эталонной температурной кривой, используемой для управления термоусадочными свойствами.

Оператор задаёт значения управляющих воздействий. Для выбранной производственной линии, типа материала и заданных управляющих воздействий с применением выбранной математической модели производится вычисление термоусадочных свойств. На основе вычисленных значений строятся графики зависимости значений термоусадочных свойств от управляющих воздействий, а также тренды зависимости характеристик усадки от управляющих воздействий. В случае отклонения значений термоусадочных свойств от задания на величину, превышающую допустимую, с использованием базы знаний осуществляется распознавание нештатных ситуаций, производится анализ причин их возникновения, выдаются рекомендации по их устранению.

Программный комплекс внедрён в систему интеллектуального анализа больших данных, что позволяет проводить анализ больших производственных данных, выявлять зависимости выходных параметров от управляющих воздействий, строить тренды зависимости показателей качества от оказывающих на них влияние управляющих воздействий.

VI. ТЕСТИРОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Тестирование работоспособности программного комплекса было проведено на примере управления термоусадочными свойствами поливинилхлоридных плёнок, произведённых на линиях заводов по производству полимерных плёнок России и Германии. Тестирование показало адекватность математических моделей, а также соответствие рекомендаций по управлению качеством полимерных плёнок [4–5].

VII. ВЫВОДЫ

Разработанные математические модели и программный комплекс позволяют осуществлять управление термоусадочными свойствами полимерных плёнок, произведённых на линиях различных конфигураций современных инновационных производств с различными требованиями по качеству и типами материалов, а также для перенастройки таких производств на новое задание по качеству [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Chistyakova T.B., Razygrayev A.S., Polosin A.N., Araztaganova A.M. Joint innovative IT projects in the field of production of polymeric sheet materials // Proceedings of 2016 IEEE 5th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), pp. 61–64.
- [2] Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016. 138 с.
- [3] Mathematical methods in plastics processing / K. Kohlert, S. Steinmeier, M. Kohlert // сб. тр. междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, 30 мая – 2 июня 2017 г. / Изд-во Политехн. ун-та, Санкт-Петербург, 2017. С. 14-21.
- [4] Гарипов Р.М., Серова В.Н., Ефремова А.А., Геркина Ж.Ю. Получение и свойства многослойной термоусадочной полимерной пленки // Вестник Казанского технологического университета. 2015, Т.18, №3. с. 174–177.
- [5] Воскресенский А.М., Сыкалов Г.В., Пантелеев А.А. Компьютерная модель каландрования листовых термопластов с высоким размерным качеством // Известия СПбГТИ(ТУ). 2014. №25 (51). С. 56–61.
- [6] Intelligence computer simulators for elearning of specialists of innovative industrial enterprises / T.B. Chistyakova, I.V. Novozhilova // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements / SCM 2016. С. 329–332.
- [7] Soe S.P., Eysers D.R., Setchi R. «Assessment of non-uniform shrinkage in the laser sintering of polymer materials» // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Cardiff University, GB. 2013. 20130803404
- [8] Kravchenko O.G., Li Chunyu, Strachan Alejandro, Kravchenko S.G., Pipes R. Byron / «Prediction of the chemical and thermal shrinkage in a thermoset polymer» // Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing. Purdue University, West Lafayette, IN, US. 2014. 20140906856