

Алоев В. З., Жирикова З. М.

Aloev V. Z., Zhirikova Z. M.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ANALYTICAL METHOD FOR PREDICTING PERFORMANCE OF POLYMER MATERIALS

Статья посвящена актуальной на сегодняшний день проблеме прогнозирования эксплуатационных свойств полимерных материалов, используемых в узлах и деталях сельскохозяйственных машин, работающих в сложных климатических условиях.

Проблема долгосрочного прогнозирования предполагает экстраполяцию результатов испытаний материалов при определенных ограниченных временных испытаниях на более длительное время. Прогнозирование свойств полимерных материалов по одному показателю старения и монотонном характере изменения свойств не представляется сложным.

При наличии нескольких показателей старения нарушается монотонный характер изменения свойств, что может быть связано с одновременным протеканием в ходе старения нескольких физико-химических процессов.

В работе предложен аналитический метод прогнозирования эксплуатационных свойств полимерных материалов для случая немонотонного изменения показателя старения.

Сущность метода, предложенного в работе, заключается в проведении ускоренных испытаний полимерных материалов, деталей и узлов из них на стойкость к старению при воздействии температур, установлении характера кинетической зависимости изменения показателя при старении, построении кривой прогноза и определения значения показателя по истечении заданной продолжительности воздействия температуры.

Кинетические кривые старения описаны в работе уравнением первого порядка и обработаны способом графического дифференцирования. Используя полученные показатели старения и константы скоростей процессов, получено уравнение прогноза изменения показателя старения с течением времени.

Ключевые слова: прогнозирование, показатель старения, аналитический метод, уравнение прогноза, графическое дифференцирование, температура

эксплуатации, регрессионный анализ, вспомогательная функция, экстраполяция.

The article is devoted to the current problem of predicting the operational properties of polymer materials used in units of agricultural machines operating in difficult climatic conditions. The long-term prediction problem involved extrapolating material test results at certain limited trial times for longer periods of time. Predicting the properties of polymer materials according to one ageing indicator and the monotonous nature of the property change does not seem difficult. If there are several indicators of aging, the monotonous character is disturbed due to a change in properties, which can be associated with the simultaneous occurrence of several physicochemical processes during aging. The paper proposes an analytical method of predicting the operational properties of polymer materials for the case of non-monotonic change in the ageing index. The essence of the method proposed in the work consists in accelerated tests of polymer materials, parts and assemblies thereof for resistance to aging under the influence of temperatures, establishment of the nature of kinetic dependence of the change in the index during aging, construction of a forecast curve and determination of the value of the indicator upon expiration of the given duration of the temperature impact. The kinetic aging curves are described in the operation by the first order equation and are worked on by a graphical differentiation method. Using the obtained aging indices and process rate constants, an equation for predicting the change in the aging index over time is obtained.

Key words: prediction, aging, analytical method, prediction equation, graphical differentiation, operating temperature, regression analysis, aging index.

Алоев Владимир Закиевич –

доктор химических наук, профессор кафедры технической механики и физики, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик
Тел.: 8 928 081 46 00
E-mail: aloev56@list.ru

Жирикова Заира Муссавна –

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической механики и физики, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик.
Тел.: 8 928 703 92 20
E-mail: zaira.dumaeva@mail.ru

Aloev Vladimir Zakievich –

Doctor of Chemical Sciences, professor in the chair of Technical mechanics and physics, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik
Tel.: 8 928 081 46 00
E-mail: aloev56@list.ru

Zhirikova Zaira Mussavna –

Candidate of physic-mathematical sciences associate professor of the department of technical mechanics and physics, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik
Tel.: 8 928 703 92 20
E-mail: zaira.dumaeva@mail.ru

Введение. Надежность сельскохозяйственной техники, выпускаемой на российских предприятиях, напрямую зависит от стабильности свойств полимерных материалов в узлах и деталях, работающих в сложных климатических условиях [1, 2]. Наиболее распространенными факторами являются температура (положительная, отрицательная, сезонные и суточные ее изменения). В связи с этим возникает проблема долгосрочного прогнозирования изменения свойств полимерных материалов. Задача прогнозирования состоит в предсказании изменения свойств материалов во времени, о поведении которых данные отсутствуют [3, 4].

Прогнозирование изменения свойств полимерных материалов проводят по одному или нескольким характерным показателям старения. При наличии нескольких показателей, испытания проводят по показателю, ответственному за работоспособность материала в изделии, или по каждому из выбранных показателей отдельно [5].

Методология проведения работы. Сущность метода, предложенного в работе, заключается в проведении ускоренных испытаний полимерных материалов, деталей и узлов из них на стойкость к старению при воздействии температуры, установления характера кинетической зависимости изменения показателя при старении, построении кривой прогноза и определении значения показателя после заданной

продолжительности воздействия температуры.

Если кривые старения материала имеют немонотонный вид, что может быть вызвано сложным характером процессов, протекающих в ходе старения материалов [6], то для описания изменения показателя может быть использовано большое количество аппроксимационных кривых.

Ход исследования. Рассмотрим аналитический метод обработки результатов испытаний при получении кинетических кривых, имеющих экстремум (максимум или минимум).

Кинетические кривые, полученные по результатам испытаний, описываются уравнением первого порядка типа:

$$x(\tau) = \gamma_1 \cdot e^{-K_1\tau} - \gamma_2 \cdot e^{-K_2\tau} + x_{\text{пред}}, \quad (1)$$

где:

γ_1 и γ_2 – коэффициенты;

K_1 и K_2 – константы скоростей процессов;

$x_{\text{пред}}$ – предельное значение показателя старения.

Для определения значения $x_{\text{пред}}$ необходимо выполнить следующие операции:

1. Способом графического дифференцирования определяют значения производных $dx/d\tau$ во всем диапазоне изменения показателя x_i при каждой из температур.

2. Строят графики зависимости $dx/d\tau$ от x_i для каждой из температур, экстраполируя последний линейный участок каждого из графиков на значение $(dx/d\tau)=0$, как показано на рис. 1 и определяют $x_{\text{пред}}$ по отрезку, отсекаемому этой прямой на оси абсцисс,

константу K – по тангенсу угла наклона (tga).

3. Если значения $x_{\text{пред}}$, определенные для всех температур, изменяются незакономерно и отличаются друг от друга не более, чем на величину максимальной относительной ошибки среднего арифметического значения показателя, то вычисляют значение $\bar{x}_{\text{пред}}$ согласно формуле (2).

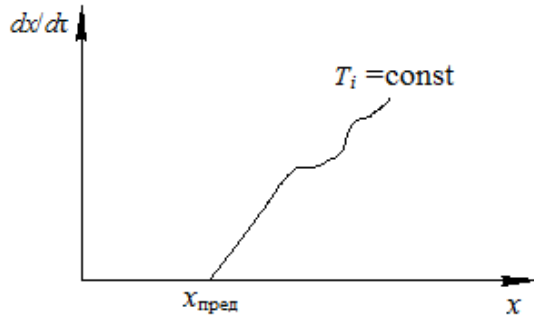


Рисунок 1 – Схематическое изображение кинетической кривой при определенной температуре T_i

$$\bar{x}_{\text{пред}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{\text{пред}, T_i}, \quad (2)$$

где:

$x_{\text{пред}, T_i}$ – предельное значение показателя при T_i ;

n – число температур старения.

При наличии максимума на кинетических кривых, как показано на рис. 2, строят график зависимости $\ln(x - \bar{x}_{\text{пред}})$ от продолжительности старения τ (рис. 3) при $\tau > \tau_m$ и по отрезку, отсекаемому на оси ординат, определяют $\ln \gamma_1$, а K_1 – по тангенсу угла наклона графика к оси абсцисс.

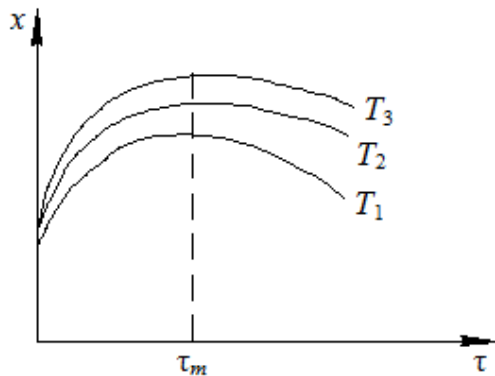


Рисунок 2 – Кинетические кривые зависимости показателя x от продолжительности старения τ при различных температурах T_i

В промежутке $0 < \tau < \tau_m$ для каждой температуры вычисляют вспомогательную функцию по формуле:

$$z(\tau) = \gamma_1 \cdot e^{-K_1 \tau} + \bar{x}_{\text{пред}} - x(\tau). \quad (3)$$

Строят график зависимости $\ln z(\tau)$ от τ , как показано на рис.4, и по отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат, определяют $\ln \gamma_2$, а по тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс – константу K_2 .

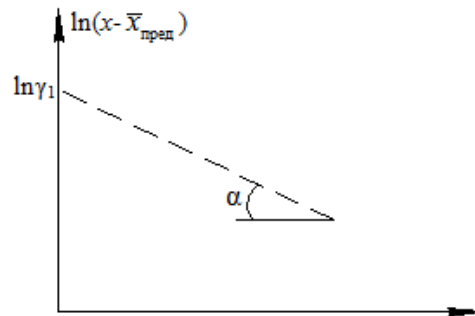


Рисунок 3 – График зависимости $\ln(x - \bar{x}_{\text{пред}})$ от продолжительности старения τ

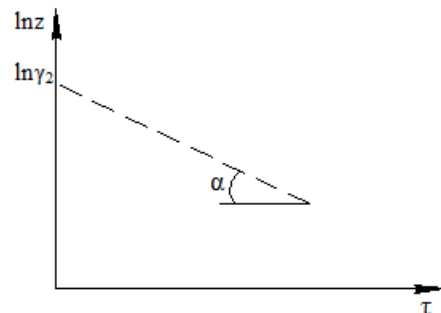


Рисунок 4 – График зависимости $\ln z(\tau)$ от продолжительности старения τ

При наличии минимума на кинетических кривых, как показано на рис.5, строят график зависимости $\ln(x - \bar{x}_{\text{пред}})$ от τ при $\tau > \tau_m$.

Экстраполируют линейный участок графика на ось ординат и определяют $\ln \gamma_2$ по отрезку, отсекаемому на этой оси. Константу K_2 определяют по тангенсу угла наклона линейного участка к оси абсцисс.

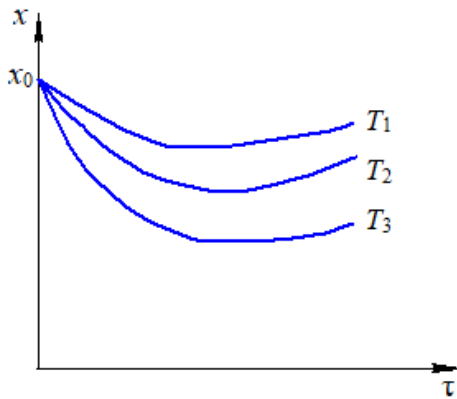


Рисунок 5 – Кинетические кривые зависимости показателя x от продолжительности старения τ при различных температурах T_i

Для каждой температуры в области $0 < \tau < \tau_m$ вычисляют вспомогательную функцию с помощью формулы:

$$z(\tau) = \gamma_2 \cdot e^{-K_2\tau} - (\bar{x}_{\text{пред}} - x(\tau)). \quad (4)$$

Строят график зависимости $\ln z(\tau)$ от τ . По отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат, определяют $\ln \gamma_1$, по тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс – K_1 .

Строят график зависимостей $\ln K_1$ от $1/T$ и $\ln K_2$ от $1/T$ (рис. 6).

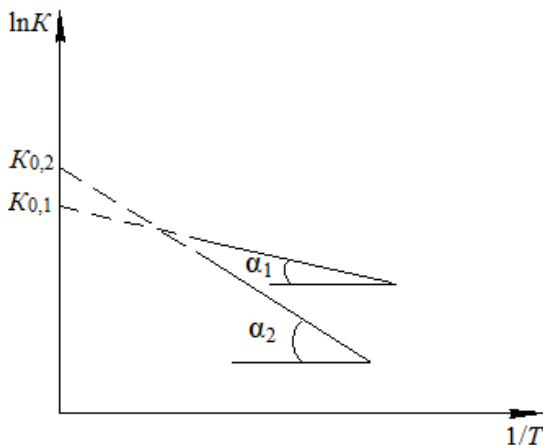


Рисунок 6 – Зависимость $\ln K_1$ и $\ln K_2$ от $1/T$

Определяют тангенсы углов наклона этих графиков у оси абсцисс и вычисляют коэффициенты E_1 и E_2 по формулам:

$$E_1 = Rtg\alpha_1, \quad (5)$$

$$E_2 = Rtg\alpha_2. \quad (6)$$

Находят значения $K_{0,1}$ и $K_{0,2}$, экстраполируя прямые на ось ординат.

Если коэффициенты γ_1 и γ_2 не закономерно изменяются от температуры,

то вычисляют средние значения $\bar{\gamma}_1$ и $\bar{\gamma}_2$. В случае закономерного изменения γ_i от T температурная зависимость γ_i описывается обратным полиномом второй степени по формуле (7), при этом, заменяя параметр x на γ_i , а параметр τ на T .

$$\gamma(T) = a_0 + \frac{a_1}{T} + \frac{a_2}{(T+1)^2}, \quad (7)$$

где:

a_0, a_1, a_2 – определяются по формулам, приведенным в ГОСТ 9.707-81 [7].

Результаты исследования. Используя полученное предельное значение показателя $\bar{x}_{\text{пред}}$, значения коэффициентов γ_1 и γ_2 , а также констант скоростей процессов K_1 и K_2 , получают уравнение прогноза изменения показателя старения с течением времени:

$$x(\tau) = \bar{x}_{\text{пред}} + \gamma_1(T) \cdot e^{-K_1\tau} - \gamma_2(T) \cdot e^{-K_2\tau}, \quad (8)$$

где:

$$K_1 = K_{0,1} e^{\frac{E_1}{RT}};$$

$$K_2 = K_{0,2} e^{\frac{E_2}{RT}}.$$

Рассчитывая значения K_1 и K_2 , γ_1 и γ_2 для температуры эксплуатации, используя уравнение прогноза, можно получить значения показателя при интересующем времени старения.

Для получения более точных значений K_1 и K_2 , γ_1 и γ_2 могут быть использованы методы регрессионного анализа. При этом полученные значения K_1 и K_2 , γ_1 и γ_2 могут служить начальным приближением в итерационной процедуре. [8].

Область применения результатов: сельскохозяйственное машиностроение, материаловедение, физика и химия.

Выводы. Предложен аналитический метод прогнозирования эксплуатационных свойств полимерных материалов, основанный на обработке результатов ускоренных испытаний и получении уравнения прогноза для случая немонотонного характера изменения показателя старения с течением времени.

Литература

1. Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. – М.: Химия, 1982. – 224 с.
2. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.

References

1. Pavlov N.N. Starenie plastmass v estestvennyh i iskusstvennyh usloviyah. – M.: Himiya, 1982. – 224 s.
2. Pronikov A.S. Nadezhnost' mashin. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 592 s.
3. Карпухин О.Н. Определение срока службы полимерного материала как физико-химическая проблема // Успехи химии. – 1980. – Т. XLIX. – Вып. 8. – С. 1523-1554.
4. Гойхман Б.Д., Смехунова Т.П. Прогнозирование изменений свойств полимерных материалов при длительном хранении и эксплуатации. – 1980. – Т. XLIX. – Вып. 8. – С. 1555-1573.
5. Метод прогнозирования срока службы полимерных изделий / Р.А. Варбанская, Л.К. Генкина, Л.Л. Ясина, В.Б. Штукарева, В.С. Пудов // Высокомолекулярные соединения. – Сер. Б. – 1979. – Т. 21. – № 10. – С. 748-751.
6. Эмануэль Н.М., Бучаченко А.Л. Химическая физика старения и стабилизации полимеров. – М.: Наука, 1982. – 359 с.
7. ГОСТ 9.707-81. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 82 с.
8. Джонсон К. Численные методы в химии. – М.: Мир, 1985. – 505 с.
3. Karpuhin O.N. Opredelenie sroka sluzhby polimernogo materiala kak fiziko-himicheskaya problema // Uspekhi himii. – 1980. – Т. XLIX. – Вып. 8. – С. 1523-1554.
4. Gojhman B.D., Smekhunova T.P. Prognozirovanie izmenenij svojstv polimernyh materialov pri dlitel'nom hranenii i ekspluatatsii. – 1980. – Т. XLIX. – Вып. 8. – С. 1555-1573.
5. Metod prognozirovaniya sroka sluzhby polimernyh izdelij / R.A. Varbanskaya, L.K. Genkina, L.L. Yasina, V.B. Shtukareva, V.S. Pudov // Vysokomolekulyarnye soedineniya. – Ser. B. – 1979. – Т. 21. – № 10. – С. 748-751.
6. Emanuel' N.M., Buchachenko A.L. Himicheskaya fizika stareniya i stabilizatsii polimerov. – M.: Nauka, 1982. – 359s.
7. GOST 9.707-81. Materialy polimernye. Metody uskorenykh ispytaniy na klimaticheskoe starenie. – M.: Izd-vo standartov, 1990. – 82 s.
8. Dzhonson K. Chislennye metody v himii. – M.: Mir, 1985. – 505 s.