

УДК 691.175:579.222.2(075)

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО  
КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА В ЗОНАХ ДЕФОРМАЦИИ  
СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**С.С. Гуреев, А.С. Клинков**

*Кафедра «Переработка полимеров и упаковочное производство»,  
ГОУ ВПО «ТГТУ»; Polymers@asp.tstu.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** качественный показатель; смешение; смесительный эффект; суммарная величина сдвига.

**Аннотация:** Выведена зависимость для расчета суммарной деформации сдвига для процесса смешения, позволяющая оценить качество получаемого композита.

---

Установлено, что на качественные показатели получаемого модифицированного вторичного термопластичного материала (прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве) определяющее влияние оказывает сдвиговая деформация, возникающая в рабочих органах смесителей. Она зависит от различных конструктивных (геометрические размеры смесителя) и технологических (частота вращения рабочих органов смесителя, фрикция, температура внутри смесительной камеры) параметров процесса смешения.

Определим комплексный интегральный критерий переработки материалов, характеризующий качественные показатели модифицированного вторичного термопластичного материала, величина которого может быть положена в основу при расчете конструктивных и технологических параметров смесительных агрегатов.

Анализ литературных источников [1, 2] показал, что в основу интегрального критерия качества может быть положена величина суммарной деформации сдвига, возникающая в рабочих зазорах перерабатывающих машин.

Величина суммарной деформации сдвига для процесса смешения и модификации отходов термопластов на смесительном оборудовании (рабочие органы – валки) (рис. 1) может быть представлена как алгебраическая сумма суммарных величин сдвига для периодического процесса вальцевания (зона I, рис. 2) и изотермического течения вязкой жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами (зоны II и III, см. рис. 2)

$$\gamma_{\text{сум}} = \gamma_{\text{в}} + k(\gamma_{\text{лц}} + \gamma_{\text{пц}}), \quad (1)$$

где  $\gamma_{\text{в}}$ ,  $\gamma_{\text{лц}}$ ,  $\gamma_{\text{пц}}$  – суммарная величина сдвига для периодического процесса вальцевания, в зазорах между стенкой камеры и вращающимися левым и правым валковыми рабочими органами соответственно;  $k$  – коэффициент перекрытия зон деформации.

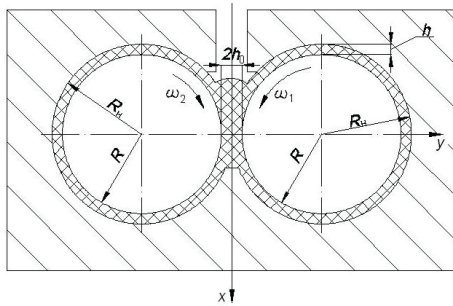


Рис. 1. Общая схема процесса смешения (рабочие органы – валки)

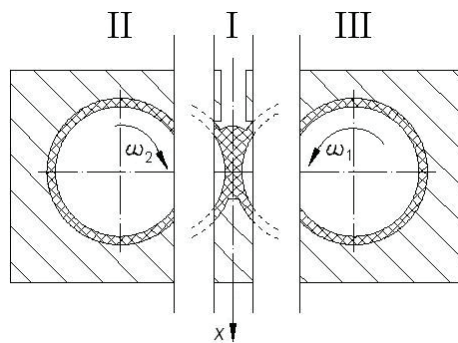


Рис. 2. Зоны деформирования материала:  
I – межвалковый зазор;  
II, III – коаксиальные цилиндры

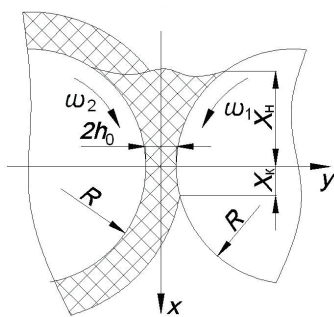


Рис. 3. Схема процесса вальцевания

Оценка смесительного эффекта при периодическом режиме процесса вальцевания (рис. 3) полимерных материалов была рассмотрена в работах [1, 2].

Таким образом, в соответствии с основными положениями теории ламинарного смешения, смесительное воздействие при однократном прохождении вальцуемого материала через зазор можно оценить по величине средней деформации сдвига, которая при этом реализуется в элементарном объеме вальцуемой массы.

В зоне поступательного течения линии тока располагаются примерно параллельно поверхности валков. Поэтому величина деформации сдвига в пределах этой зоны определяется выражением [3]

$$\begin{aligned} \gamma &= \left(\frac{R}{h_0}\right)^{1/2} \frac{U_0}{v_x} \int_{X_H}^{X_K} \frac{3\eta(X^2 - X_H^2) + \lambda(1 + X^2)}{(1 + \lambda^2)^2} dX = \\ &= \left(\frac{R}{h_0}\right)^{1/2} \frac{U_0}{v_x} \left\{ \frac{3\eta}{4} \left[ (1 - X_K^2)(\arctg X_K - \arctg X_H) + \frac{(1 + X_K^2)X_H}{1 + X_H^2} - X_K \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda}{2} \left( \frac{X_K}{1 + X_K^2} - \frac{X_H}{1 + X_H^2} + \arctg X_K - \arctg X_H \right) \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $v_x$  – скоростной поток в направлении оси  $X$ ;  $U_0 = (U_1 + U_2)/2$  – средняя величина окружной скорости валков, мм/с;  $U_1, U_2$  – величины окружных скоростей, соответственно левого и правого валков, мм/с;  $\lambda = U_1 - U_2/2U_0$ ;  $\eta = y/h$ ;  $R$  – радиус валков, мм;  $h_0$  – половина межвалкового зазора, мм.

Величина средней деформации сдвига, которой подвергается удельный объем материала при однократном проходе через зазор,

$$\bar{\gamma} = \int_{-1}^{+1} \gamma d\eta / Q \frac{X_K X_H}{U_0}. \quad (3)$$

При этом

$$X_{\kappa}^2 = Q/2U_0h_0 - 1. \quad (4)$$

Тогда, учитывая выражение (3), получим

$$\bar{\gamma} = \int_{-1}^{+1} \gamma d\eta / \left[ 2h_0(2h_0R)^{1/2} (1 + X_{\kappa}^2) (X_{\kappa} - X_{\text{H}}) \right]. \quad (5)$$

Вычисляем определенный интеграл, входящий в уравнение (3):

$$\int_{-1}^{+1} \frac{\eta d\eta}{v_x} \approx \frac{1}{U_0} \left[ \frac{1 - \lambda}{1 - \lambda^2 (1 + X_{\kappa}^2)} \right]; \quad (6)$$

$$\int_{-1}^{+1} \frac{d\eta}{v_x} = \frac{1}{2U_0(1 + X_{\kappa}^2)}. \quad (7)$$

Тогда, величина средней удельной деформации сдвига, реализуемой за один проход при вальцевании с фрикцией, будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} = & \left\{ \frac{3}{4} \left[ (1 - X_{\kappa}^2) (\text{arctg} X_{\kappa} - \text{arctg} X_{\text{H}}) + \frac{(1 + X_{\kappa}^2) X_{\text{H}} - X_{\kappa}^2}{1 + X_{\text{H}}^2} \right] \frac{1 - \lambda}{1 - \lambda^2 (1 + X_{\kappa}^2)} + \right. \\ & \left. + \frac{\lambda}{4(1 + X_{\kappa}^2)} \left( \frac{X_{\kappa}}{1 + X_{\kappa}^2} - \frac{X_{\text{H}}}{1 + X_{\text{H}}^2} + \text{arctg} X_{\kappa} - \text{arctg} X_{\text{H}} \right) \right\} \times \\ & \times \left[ \frac{1}{2\sqrt{2}h_0^2 (1 + X_{\kappa}^2) (X_{\kappa} - X_{\text{H}})} \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

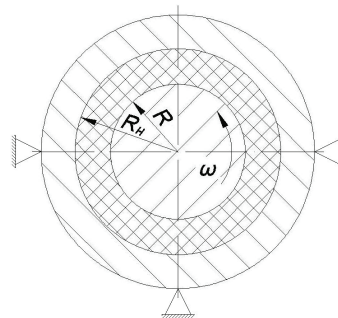
Суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал за все время вальцевания, равна произведению однократного воздействия на число проходов

$$\gamma_{\text{п}} = \bar{\gamma} i(t). \quad (9)$$

где  $i(t) = \frac{U_0 t (1 + X_{\kappa}^2)}{(X_{\kappa} - X_{\text{H}}) \sqrt{2R} h_0}$  – число проходов;  $t$  – время процесса, с.

Оценка смесительного воздействия на полимерный материал в случае процесса изотермического движения жидкости, находящейся в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами, из которых наружный – неподвижен, а внутренний вращается с некоторой окружной скоростью (рис. 4), была рассмотрена в работах [1–3]. Для левого и правого рабочих пространств формулы будут идентичными за исключением величин скоростей.

Величина скорости сдвига вычисляется по формуле



**Рис. 4. Схема установившегося изотермического течения жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами**

$$\dot{\gamma} = 2U/Rn(1 - \beta^{2/n}), \quad (10)$$

где  $U$  – окружная скорость внутреннего цилиндра, мм/с;  $R$  – радиус внутреннего цилиндра, мм;  $\beta = \frac{R_H}{R}$  – отношение радиуса внешнего цилиндра к радиусу внутреннего цилиндра;  $n$  – индекс течения расплава.

Суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал за время  $t$ , определяется следующим образом

$$\gamma = 2Ut/Rn(1 - \beta^{2/n}). \quad (11)$$

Из вышеприведенных расчетов следует, что величина суммарной деформации сдвига для процесса модификации отходов термопластов на смесительном оборудовании (рабочие органы типа валков) может быть определена следующим образом

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{сум}} = & \frac{3}{4} \left[ (1 - X_K^2) \arctg X_K - \arctg X_H \right] + \frac{(1 + X_K^2) X_H - X_K^2}{1 + X_H^2} \left[ \frac{1 - \lambda}{1 - \lambda^2 (1 + X_K^2)} + \right. \\ & \left. + \frac{\lambda}{4(1 + X_K^2)} \left( \frac{X_K}{1 + X_K^2} - \frac{X_H}{1 + X_H^2} + \arctg X_K - \arctg X_H \right) \frac{U_0 t (1 + X_K^2)}{(X_K - X_H) \sqrt{2Rh_0}} + \right. \\ & \left. + 0,7 \frac{t2(U_1 + U_2)}{Rn(1 - \beta^{2/n})} \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

Проведенные экспериментальные исследования процесса модификации полиэтилена низкой плотности активированной сажой показали, что суммарная величина сдвига в рабочих органах полимерперерабатывающих машин является оценочным показателем качества получаемого композиционного полимерного материала.

#### *Список литературы*

1. Мак-Келви, Д.М. Переработка полимеров / Д.М. Мак-Келви. – М. : Химия, 1965. – 442 с.
2. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р.В. Торнер. – М. : Химия, 1977. – 464 с.
3. Оборудование для переработки пластмасс : справ. пособие / Под ред. В.К. Завгороднего. – М. : Машиностроение, 1976. – 407 с.
4. Исследование свойств вторичного гранулята, полученного на валково-шнековом агрегате / Д.Л. Полушкин [и др.] // Процессы, технологии, оборудование и опыт переработки отходов и вторичного сырья : III Всерос. науч.-практ. конф. : Известия Самарского научного центра РАН / Самарск. науч. центр РАН. – Самара, 2008. – С. 56–62.
5. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А.С. Клинков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870–881.
6. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов : монография / А.С. Клинков [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 320 с.

## Testing Method for Integral Quality Criterion in the Deformation Zones of Mixing Devices

S.S. Gureev, A.S. Klinkov

Department "Processing of Polymers and Packaging", TSTU;  
Polymers@asp.tstu.ru

**Key words and phrases:** qualitative index; mixing; mixing effect; total value of the shear.

**Abstract:** The dependence for the total deformation shear calculation for the mixing process, which makes it possible to estimate the quality of the obtained composite, is determined.

---

### Methodik der Bestimmung des Integralkriteriums der Qualität in den Zonen der Deformierung der Mischanlagen

**Zusammenfassung:** Es ist die Abhängigkeit für die Berechnung der Summardeformierung der Verschiebung für das Mischprozess aufgestellt. Sie erlaubt die Qualität des erhaltenden Komposites einzuschätzen.

---

### Méthode de la définition du critère intégral de la qualité dans les zones de la déformation des dispositifs mélangeurs

**Résumé:** Est déduite la dépendance pour le calcul de la déformation sommaire du décalage pour un processus du mélange permettant d'évaluer la qualité du composite obtenu.

---

**Авторы:** *Гуреев Сергей Сергеевич* – аспирант кафедры «Переработка полимеров и упаковочное производство»; *Клинков Алексей Степанович* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Переработка полимеров и упаковочное производство», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Ванин Василий Агафонович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», ГОУ ВПО «ТГТУ».