

УДК 621.74.045

Фесенко А. Н., Порохня С. В.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛОВОЙ МОДЕЛИ

При изготовлении деталей и заготовок методом литья их качество зависит от большого количества факторов и параметров технологического процесса. Наряду с теплофизическими, гидродинамическими и массообменными процессами, протекающими в литейной форме при заливке и затвердевании расплава, на качество получаемых отливок большую роль оказывает газовый режим литейной формы. Особое значение для получения качественных отливок без дефектов газового происхождения газовые процессы приобретают при литье по газифицируемым пенополистироловым моделям.

Изучению кинетики газовой выделения и определению качественного и количественного состава продуктов термодеструкции пенополистирола посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных исследователей [1–4]. Качественный и количественный состав продуктов термодеструкции пенополистирола марки ПСВ-Л при температурах пиролиза 973, 1573 и 1823 К представлен в работе [5].

В то же время расширение внедрения прогрессивного способа литья по газифицируемым моделям для изготовления точных отливок широкой номенклатуры из различных сплавов вызывает необходимость дальнейшего изучения процессов термической деструкции пенополистироловых газифицируемых моделей при различных режимах литья и взаимодействия продуктов их разложения с материалом отливки.

Целью данной работы является установление аналитических зависимостей кинетики газовой выделения при термодеструкции пенополистироловых моделей в широком диапазоне температур.

В работе [6] выполнен теоретический анализ заполнения формы металлом с газифицируемой моделью кажущейся плотности 20 кг/м^3 . При этом для моделирования процесса принималась плотность газовой смеси $0,7 \text{ кг/м}^3$, что соответствует плотности газа метана. Однако, как свидетельствуют представленные в работе [5] данные количественного анализа продуктов термической деструкции пенополистирола, доля метана в газовой смеси не является ведущей. В состав газовой смеси наряду с метаном входят так же водород, окись углерода, этилен, этан, ацетилен, изопентан, пропилен, пропан. Поэтому для газовой смеси, состоящей из нескольких компонентов, целесообразно плотность определять по уравнению [7]:

$$\rho_{см} = \frac{m}{\frac{a}{\rho_1} + \frac{b}{\rho_2} + \frac{c}{\rho_3} + \dots}, \quad (1)$$

где m – масса образца, кг;

a, b, c, \dots – количество соответствующего газообразного компонента в смеси, кг;

$\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots$ – плотность отдельных газообразных компонентов, кг/м^3 .

Используя данные [5] по количественному составу продуктов термодеструкции пенополистирола, по зависимости (1) произвели расчеты плотности газовой смеси $\rho_{см}$, образующейся в процессе разложения пенополистироловой модели при температурах 973, 1573 и 1823 К, результаты которых представлены в табл. 1.

Рассчитав значения плотностей смеси газов, которые выделяются при термодеструкции пенополистироловой модели при трех фиксированных температурах, и предположив, что характер изменения плотности газовой смеси в диапазоне рассматриваемых температур 973–1823 К носит монотонный характер, используя возможности пакета «Microsoft Excel», получаем графическую зависимость (рис. 1) и уравнение регрессии, описывающие изменение плотности газовой смеси $\rho_{см}$ от температуры термической деструкции пенополистирола T в диапазоне 973–1823 К.

Таблица 1

Плотность газовой смеси $\rho_{см}$, образующейся в процессе разложения пенополистироловой модели

Температура термической деструкции пенополистирола, К	973	1573	1823
Плотность газовой смеси, $\rho_{см}$, кг/м ³	8,8806	4,9085	2,1314

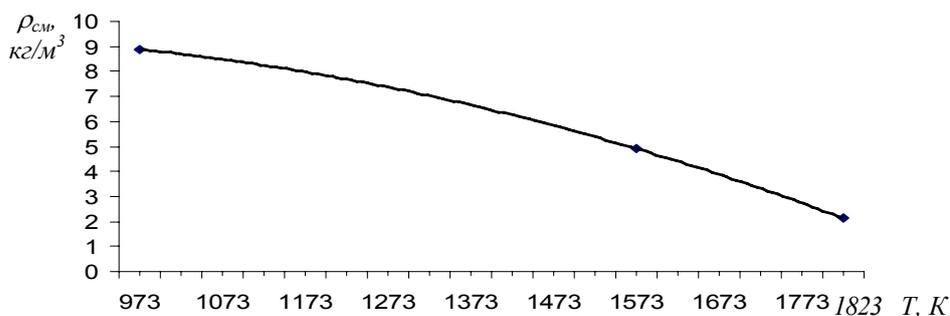


Рис. 1. Зависимость изменения плотности газовой смеси $\rho_{см}$ от температуры термической деструкции пенополистирола T

Графическая зависимость, представленная на рис. 1, позволяет определять плотность образующейся газовой смеси при разложении пенополистирола под действием тепла заливаемого жидкого металла во всем диапазоне рассматриваемых температур, что охватывает как температурные условия при заливке литейных форм алюминиевыми сплавами, так и при заливке форм сталью.

При этом полученное уравнение регрессии имеет вид:

$$\rho_{см} = -0,0132 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^2 - 0,1462 \left(\frac{T - 923}{50} \right) + 9,04, \quad (2)$$

где $\rho_{см}$ – плотность газовой смеси кг/м³;

T – температура газификации, К.

Величина достоверности аппроксимации $R_2 = 1$.

Аналогично по формуле (1) рассчитали плотность жидкой фазы продуктов термической деструкции пенополистирола, которые по данным исследований [5] состоят из толуола, бензола и стирола. Как показали результаты расчета, плотность жидкой фазы продуктов термической деструкции в диапазоне температур 973–1823 К колеблется от 894 до 899 кг/м³ и в среднем составляет 896,5 кг/м³.

Зная плотность газовой смеси $\rho_{см}$, пользуясь формулой:

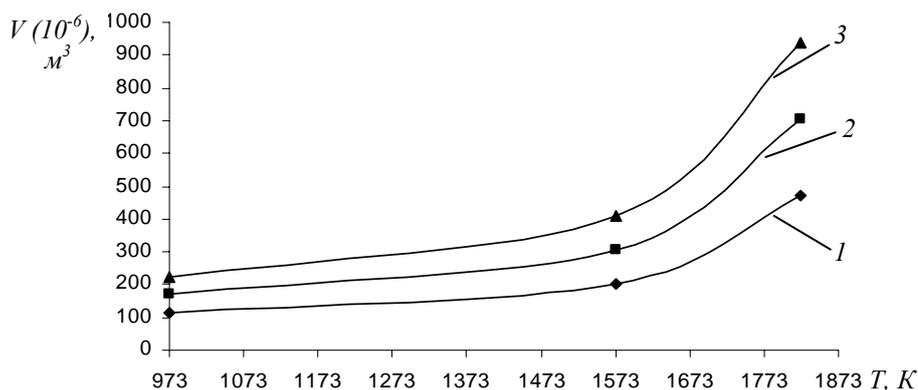
$$V = \frac{m}{\rho_{см}}, \tag{3}$$

рассчитали количество выделившихся газов V при деструкции пенополистироловых моделей кажущейся плотности 20, 30 и 40 кг/м³ массой $m = 1$ г (газотворную способность) для трех фиксированных температур (973, 1573 и 1823 К). Результаты расчета представлены в табл. 2.

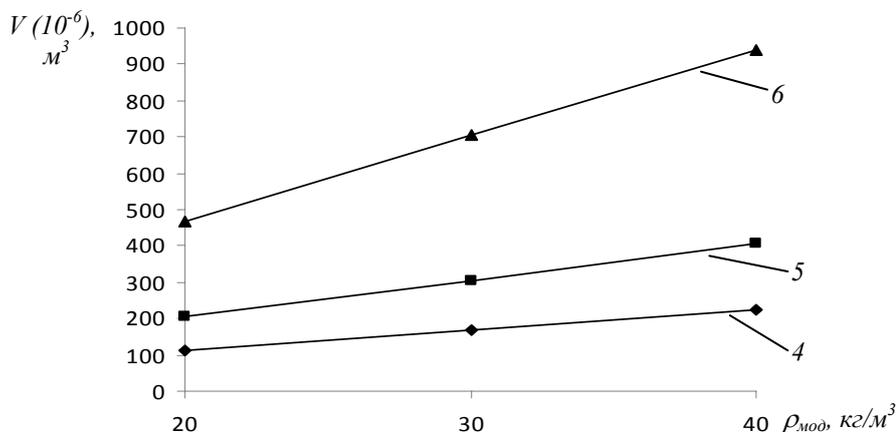
Таблица 2

Данные по количеству выделившихся газов при газификации пенополистироловых моделей

Температура газификации T , К	Количество выделившихся газов, V , м ³ (10^{-6}) при газификации пенополистироловых моделей с кажущейся плотностью $\rho_{мод}$, кг/м ³		
	20	30	40
973	112,605	168,908	225,210
1573	203,728	305,592	407,457
1823	469,175	703,763	938,350



а



б

Рис. 2. Зависимость количества выделившихся газов при деструкции 1 г пенополистироловой модели от температуры газификации (а):

1 – кажущейся плотности модели 20 кг/м³; 2 – 30 кг/м³; 3 – 40 кг/м³; и от кажущейся плотности моделей (б): 4 – при температуре 973 К; 5 – 1573 К; 6 – 1823 К

На рис. 2, а представлені побудовані з використанням пакета програм «Microsoft Excel» графічні залежності газотворної здатності V при деструкції пенополістиролових моделей кажущоїся щільності $\rho_{\text{мод}} = 20, 30$ і 40 кг/м^3 від температури газифікації в діапазоні температур $T = 973\text{--}1823 \text{ К}$, а на рис. 2, б – залежності газотворної здатності V від кажущоїся щільності газифікуваних моделей $\rho_{\text{мод}}$ для трьох фіксованих температур T (973, 1573 і 1823 К).

Як випливає з представлених на рис. 2 графічних залежностей, кількість виділяючихся газів при термодеструкції пенополістиролових моделей зростає з збільшенням їх кажущоїся щільності і при збільшенні температури заливаемого металу.

Для визначення кількості газів, виділяючихся при деструкції пенополістиролових моделей певної щільності при конкретних температурних режимах лиття важливо мати аналітичні залежності, що зв'язують ці параметри. З цією метою, використовуючи графічні залежності, представлені на рис. 2 і можливості пакета «Microsoft Excel», отримали емпіричні рівняння регресії, що дозволяють визначити кількість виділяючихся газів V (10^{-6} м^3) при деструкції 1 г пенополістиролової моделі кажущоїся щільністю $\rho_{\text{мод}}$ (20, 30 і 40 кг/м^3) в інтервалі температур T (973...1823 К). Ці залежності мають наступний вигляд:

– для пенополістиролових моделей з кажущоїся щільністю $\rho_{\text{мод}} = 20 \text{ кг/м}^3$:

$$V = (4,97 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,14 \cdot T + 110,20) \cdot e^{1,68 \cdot 10^{-3} \cdot T}; \quad (4)$$

– для пенополістиролових моделей з кажущоїся щільністю $\rho_{\text{мод}} = 30 \text{ кг/м}^3$:

$$V = (7,46 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,21 \cdot T + 165,28) \cdot e^{1,68 \cdot 10^{-3} \cdot T}; \quad (5)$$

– для пенополістиролових моделей з кажущоїся щільністю $\rho_{\text{мод}} = 40 \text{ кг/м}^3$:

$$V = (9,95 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,28 \cdot T + 220,37) \cdot e^{1,68 \cdot 10^{-3} \cdot T}. \quad (6)$$

Крім того, були знайдені емпіричні рівняння регресії, що зв'язують газотворну здатність пенополістиролових моделей V в діапазоні досліджуваних щільностей $\rho_{\text{мод}}$ (20...40 кг/м^3) при температурі деструкції T рівній 973, 1573 і 1823 К, які мають наступний вигляд:

– при температурі металу $T = 973 \text{ К}$:

$$V = 5,6303 \rho_{\text{мод}} + 0,0002; \quad (7)$$

– при температурі металу $T = 1573 \text{ К}$:

$$V = 10,186 \rho_{\text{мод}} - 0,0012; \quad (8)$$

– при температурі металу $T = 1823 \text{ К}$:

$$V = 23,459 \rho_{\text{мод}} + 0,0002. \quad (9)$$

Сопоставлення розрахованих значень газотворної здатності пенополістиролу по отриманим рівнянням з наявними в літературі даними [8] показує достатньо хорошу збіжність, що підтверджує можливість застосування отриманих рівнянь регресії для аналізу процесів газовиділення при газифікації пенополістиролових моделей.

Для практического использования способа литья по пенополистироловым моделям для изготовления отливок из различных сплавов важно знать и анализировать газовые процессы, протекающие в конкретных температурно-временных условиях. Для этого используя данные работы [5] и пакет программ «Microsoft Excel» нашли эмпирические уравнения регрессии изменения относительной газотворности пенополистироловой модели V_o с кажущейся плотностью $\rho_{\text{мод}} = 20 \text{ кг/м}^3$ в зависимости от скорости подъема металла в полости литейной формы v при температурах заливки T равных 973, 1573 и 1823 К. Полученные уравнения имеют следующий вид:

– при температуре металла $T = 973 \text{ К}$:

$$V_o = 111,57(v + 1)^{-0,4456} ; R_2 = 0,9903; \tag{10}$$

– при температуре металла $T = 1573 \text{ К}$:

$$V_o = 199,26(v + 1)^{-0,3816} ; R_2 = 0,9859; \tag{11}$$

– при температуре металла $T = 1823 \text{ К}$:

$$V_o = 471,91(v + 1)^{-0,4899} ; R_2 = 0,9985. \tag{12}$$

Установив эмпирические уравнения (10–12), описывающие изменение относительной газотворности пенополистироловой модели V_o при фиксированных температурах 973, 1573 и 1823 К от скорости подъема металла в полости формы v , предполагая монотонный характер этих зависимостей во всем рассматриваемом диапазоне температур и используя программу «Microsoft Excel», рассчитали изменения газотворности пенополистироловой модели V_o с кажущейся плотностью $\rho_{\text{мод}} = 20 \text{ кг/м}^3$ в диапазоне скорости заливки v от 0,5 до 9 см/с и температур T от 973 до 1823 К. Полученные графические зависимости представлены на рис. 4.

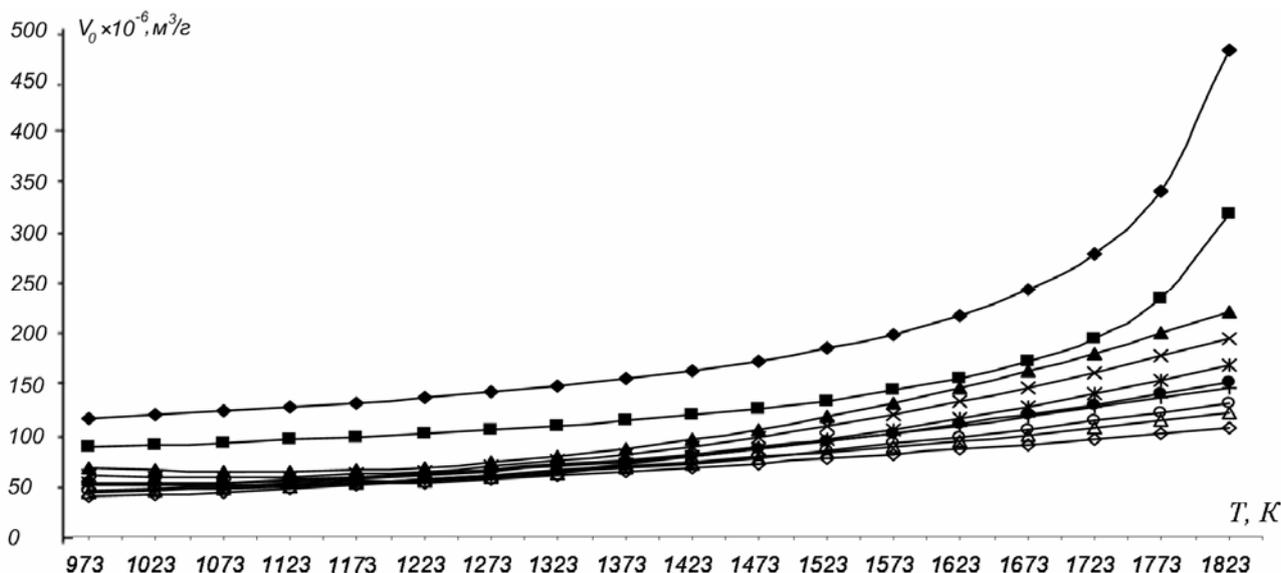


Рис. 4. Зависимость изменения относительной газотворности пенополистироловой модели V_o от температуры заливаемого металла T :

скорость подъема уровня металла в полости формы v : \blacklozenge – 0,5 см/с; \blacksquare – 1 см/с; \blacktriangle – 2 см/с; \times – 3 см/с; \ast – 4 см/с; \bullet – 5 см/с; $+$ – 6 см/с; \circ – 7 см/с; \triangle – 8 см/с; \diamond – 9 см/с

Рис. 4 позволяет прогнозировать величину газовыделения при заливке пенополистироловых моделей с кажущейся плотностью $\rho_{\text{мод}} = 20 \text{ кг/м}^3$ в диапазоне температур T от 973 до 1873 К с учетом скорости подъема металла в форме ν .

Используя программу «Microsoft Excel» и рис. 4 определили эмпирические зависимости изменения относительной газотворности пенополистироловой модели V_o от температуры заливаемого металла T для скоростей заливки ν в диапазоне 0,5...9 см/с, которые имеют вид:

– для скорости подъема металла в полости формы $\nu = 0,5 \text{ см/с}$:

$$V_o = 471,91 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^{-0,4899}; \quad (13)$$

– для скорости подъема металла в полости формы $\nu = 1 \text{ см/с}$:

$$V_o = 313,9 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^{-0,4458}; \quad (14)$$

– для скорости подъема металла в полости формы $\nu = 2 \text{ см/с}$:

$$V_o = 0,7431 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^2 - 23,002 \left(\frac{T - 923}{50} \right) + 240,26; \quad (15)$$

– для скорости подъема металла в полости формы $\nu = 3 \text{ см/с}$:

$$V_o = 0,5814 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^2 - 18,87 \left(\frac{T - 923}{50} \right) + 210,29; \quad (16)$$

– для скорости подъема металла в полости формы $\nu = 4 \text{ см/с}$:

$$V_o = 0,4912 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^2 - 16,038 \left(\frac{T - 923}{50} \right) + 181,55; \quad (17)$$

– для скорости подъема металла в полости формы $\nu = 5 \text{ см/с}$:

$$V_o = 0,348 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^2 - 12,436 \left(\frac{T - 923}{50} \right) + 162,09; \quad (18)$$

– для скорости подъема металла в полости формы $\nu = 6 \text{ см/с}$:

$$V_o = 0,2676 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^2 - 10,674 \left(\frac{T - 923}{50} \right) + 154,41; \quad (19)$$

– для скорости подъема металла в полости формы $v = 7$ см/с:

$$V_o = 0,2246 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^2 - 9,2177 \left(\frac{T - 923}{50} \right) + 137,33; \quad (20)$$

– для скорости подъема металла в полости формы $v = 8$ см/с:

$$V_o = 0,1732 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^2 - 7,8446 \left(\frac{T - 923}{50} \right) + 126,98; \quad (21)$$

– для скорости подъема металла в полости формы $v = 9$ см/с:

$$V_o = 0,1317 \left(\frac{T - 923}{50} \right)^2 - 6,7248 \left(\frac{T - 923}{50} \right) + 118,36. \quad (22)$$

Величина достоверности аппроксимации для всех вышеприведенных уравнений (13–22) $R_2 = 1$.

ВЫВОДЫ

Получены эмпирические зависимости кинетики газовыделения при термической деструкции пенополистироловых моделей с кажущейся плотностью $20 \dots 40$ кг/м³, в диапазоне температур $973 \dots 1823$ К и скорости подъема зеркала металла в полости литейной формы от $0,5$ до 9 м/с, которые позволяют учитывать эти параметры при создании математической модели способа литья по газифицируемым моделям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование взаимодействия углерода термодеструкции модели с металлом методом радиоактивных изотопов / Л. П. Анненко, Д. Д. Переверзев, В. С. Шуляк, Е. А. Марковский // *Литье по газифицируемым моделям*. – Киев : ИПЛ АН УССР, 1975. – С. 25–28.
2. Житник А. С. Массоперенос паробразной фазы в литейной форме при деструкции газифицируемой модели / А. С. Житник, В. С. Шуляк, Б. Г. Горловский // *Литье по газифицируемым моделям*. – Киев : ИПЛ АН УССР, 1975. – С. 40–42.
3. Антипенко В. Ф. Способ газификации моделей, обеспечивающий санитарно-гигиенические условия труда / В. Ф. Антипенко, В. С. Конотопов, Л. А. Черкасова // *Литье по газифицируемым моделям*. – Киев : ИПЛ АН УССР, 1975. – С. 125–133.
4. Шуляк В. С. *Литье по газифицируемым моделям*. – СПб. : НПО «Профессионал», 2007. – 408 с.
5. Конашко И. Г. Термодинамическая оценка взаимодействия газообразных продуктов в форме при литье по газифицируемым моделям / И. Г. Конашко, Е. М. Носова, Ф. И. Чаплыгин // *Литье по газифицируемым моделям*. – Киев : ИПЛ АН УССР, 1975. – С. 51–53.
6. *Литье по газифицируемым моделям* / Ю. А. Степанов, Д. С. Гришин, В. П. Кирпиченков, В. А. Павлов, В. С. Шуляк. – М. : Машиностроение, 1976. – 218 с.
7. Бесков С. Д. *Технохимические расчеты* / С. Д. Бесков. – М. : Высшая школа, 1966. – 520 с.
8. Озеров В. А. *Литье по моделям из пенополистирола* / В. А. Озеров, В. С. Шуляк, Г. А. Плотников. – М. : Машиностроение, 1970. – 182 с.