

УДК 621. 793.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НАНЕСЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ТЕРМОРАСПЫЛЕНИЕМ ЭКСТРУДАТОВ**

*канд. техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, А.В. ЧЕКУЛАЕВ  
(Институт механики и надежности машин НАН Беларуси, Минск)*

*Представлена расчетная оценка возможности нанесения композиционных полимерных покрытий газопламенным диспергированием полимерных проволочных экструдатов.*

**Введение.** Применение полимеров для защиты от коррозии и износа является одним из наиболее эффективных путей повышения долговечности деталей и элементов конструкций. Покрытия, формируемые из дисперсных полимеров, успешно заменяют традиционные лаки и краски, технологию гальваники, гуммирование.

Анализ методов нанесения полимерных покрытий показывает, что абсолютное большинство из них может быть реализовано только при изготовлении изделий и наличии специальных камер, ванн и т.д. К этим методам относятся вихревой, электро- и трибостатический, шликерный. Причем требуемая плотность и адгезия достигаются последующей термообработкой сформированного слоя. Таким образом, данные методы не могут быть реализованы в условиях химических и нефтеперерабатывающих предприятий, при ремонте уже покрытых деталей или при защите элементов конструкций без разборки агрегатов на месте их эксплуатации.

Одним из наиболее экономичных и простых в реализации методов нанесения полимерных покрытий является газотермическое напыление, позволяющее формировать и оплавливать слой в одной технологической операции. Оборудование для газотермического напыления имеет малый вес и габариты, не требует источников электропитания, может эксплуатироваться в нестационарных условиях. Однако технологии, использующие полимер в виде порошка для напыления покрытий, имеет следующие недостатки:

- при хранении и транспортировке порошки насыщаются влагой, слеживаются, образуют конгломераты;
- в процессе сушки при 50...60 °С порошки низкоплавких полиэфиров (например, вторичного полиэтилентерефталата) спекаются;
- невозможность обеспечения равномерного распределения в покрытии наполнителя, введенного в напыляемую композиционную шихту (особенно наноразмерных наполнителей).

Опыт газотермического напыления металлических покрытий свидетельствует о том, что указанных недостатков лишены шнуровые, проволочные или прутковые материалы. Отечественной промышленностью выпускаются полимерные ровинговые экструдаты, например, из полиамида, стоимостью не более 2 долларов за килограмм, однако ни в Беларуси, ни в промышленно развитых странах мира нет технических средств для нанесения полимерных покрытий распылением ровинговых экструдатов. Кроме того, в классических работах по газопламенному напылению отмечается, что из-за низкой теплопроводности полимеров и низкой температуры деструкции процесс распыления полимерных проволок осуществить невозможно [1].

**Целью исследований,** результаты которых приведены в данной работе, явилась расчетная оценка возможности нанесения композиционных полимерных покрытий диспергированием полимерных проволочных экструдатов.

**Теоретический анализ процесса.** Установившийся процесс распыления полимерного экструдата, подаваемого в распыляющий газопламенный факел по его оси, можно представить следующим образом. В результате теплового воздействия высокотемпературной газовой струи, образованной при сжигании газозвушной смеси в камере сгорания, в сечении экструдата можно выделить термические зоны 8(т),

отличающиеся температурой и фазовым состоянием. На поверхности формируется слой расплавленного полимера, который удерживаются на нем, пока силы поверхностного натяжения больше напора струи протекающих газов. В тот момент, когда сила воздействия струи превысит силу поверхностного натяжения, от расплавленного материала отрываюся капли и увлекаются потоком горячего газа. При этом гравитационные силы можно не учитывать, поскольку вес частицы на несколько порядков меньше силы, действующей со стороны струи.

В процессе эвакуации полимера с поверхности экструдата в зоне ядра факела распыляемый материал приобретает форму удлиненного конуса (рис. 1). Образование тонкой расплавленной зоны  $\chi$  в полимерах обуславливается низкой теплопроводностью  $\lambda$  и относительно небольшим коэффициентом теплоотдачи  $h$ . Поэтому, рассматривая установившийся процесс распыления, можно предполагать, что в

области ядра факела, в любом сечении полимерного экструдата образуются зоны с различной температурой. У поверхности она приобретает температуру плавления, а внутренняя зона находится в частично кристаллическом состоянии (см. рис. 1).

С увеличением температуры полимера при  $T > T_g$  ( $T_g$  - температура размягчения) его теплопроводность резко уменьшается [2], т.е. расплавленный поверхностный слой является изолятором тепла по отношению к внутренней полукристаллической непрогретой зоне. Таким образом, возрастает вероятность того, что дальнейшее сообщение тепловой энергии материалу будет приводить к его деструкции (испарению), а не прогреванию внутреннего слоя экструдата.

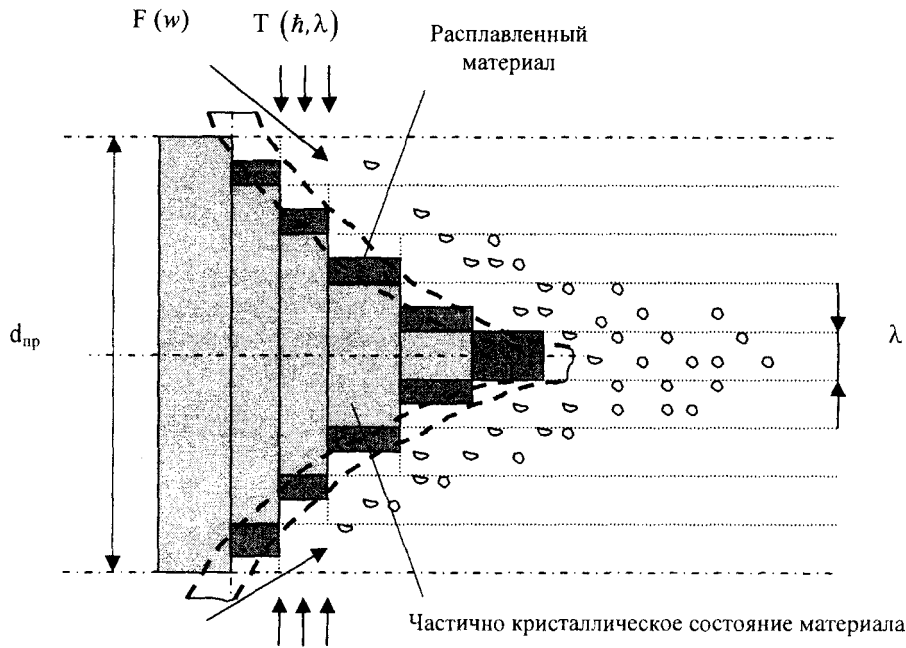


Рис. 1. Схема распыления полимерного экструдата

Рассматривали процесс диспергирования экструдата как отрыв материала слоя  $\chi$  в виде сферических капель.

Каждая сорвавшаяся капля испытывает силу сопротивления по закону Ньютона:

$$F_c = \xi S \rho \frac{w}{2}, \quad (1)$$

где  $w$  – скорость потока, м/с;  $\xi$  – коэффициент сопротивления среды;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения капли (частицы), м<sup>2</sup>.

Условие, когда капля еще остается на проволоке перед ее срывом, определяется равенством срывающих и удерживающих ее сил [3]:

$$\xi S \rho \frac{w}{2} = 2\pi\delta(x)G, \quad (2)$$

где  $G$  – поверхностное натяжение, Дж/м<sup>2</sup>;  $\delta(x)$  – толщина слоя расплавленного полимера, м.

Выражая площадь поперечного сечения капли  $S$  через диаметр  $D$ , максимальный диаметр диспергированных частиц определится как:

$$D = w^{-1} \sqrt{\frac{16G\delta(x)}{\xi\rho}}. \quad (3)$$

**Результаты расчета и их обсуждение.** Для нахождения диаметра частиц требовалось определить физические величины, входящих в выражение (3). Значения  $w$ ,  $\xi$ ,  $\rho$  являются характеристиками термораспылителя, а  $G$  и  $\delta$  зависят от физических свойств распыляемого материала.

Для определения величины  $\delta(\tau)$  строили зависимость  $T = T(x, \tau)$ , причем для всех значений  $x > \delta(\tau)$ , считали, что теплота не распространяется за пределы  $x = \delta(\tau)$  и температура тела равна начальной температуре [4].

Распределение температур в экструдате описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Начальная температура:

$$T(x, 0) = T_0. \quad (5)$$

Граничные условия:

$$-\lambda \partial T(0, \tau) / \partial x = q(\tau); \quad (6)$$

$$T(\delta, \tau) = T_0; \quad (7)$$

$$\partial T(\delta, \tau) / \partial x = 0. \quad (8)$$

Зависимость  $T = T(x, \tau)$  определили, используя интегральный метод теплового баланса [4].

$$T = T(x, \tau) = T_0 + q(\tau) / [2\lambda\delta(\tau)] [\delta(\tau) - x]^2; \quad (9)$$

$$\delta = \sqrt{6a \left[ q^{-1}(\tau) \int_0^\tau q(t) dt \right]^{1,2}}. \quad (10)$$

Положив в (9)  $x = 0$  и подставив  $\delta(\tau)$  из (10) в (9), определили температуру поверхности тела:

$$T = T(0, \tau) = T_0 + \sqrt{3/2} \sqrt{a/\lambda} \left[ q(\tau) \int_0^\tau q(t) dt \right]^{1,2}. \quad (11)$$

Рассмотрев частный случай, когда плотность теплового потока постоянна, из (10) и (11) следовало:

$$\delta(\tau) = \sqrt{6a\tau}; \quad (12)$$

$$T = T(0, \tau) = T_0 + \sqrt{3/2q} \sqrt{a\tau/\lambda}. \quad (13)$$

На следующем этапе расчета определяли силы поверхностного натяжения, для чего использовали понятие аддитивной функции парахор [2].

Поскольку аэродинамический коэффициент сопротивления  $\xi$  является функцией критерия Рейнольдса  $Re$ , его находили следующим образом [5]:

$$\xi = 10,8 / \sqrt{Re} \text{ при } Re = 1,0 \dots 10; \quad \xi = 12 / \sqrt{Re} \text{ при } Re \text{ от } 10 \text{ до } 1000. \quad (14)$$

При этом критерий  $Re$  находится из выражения:

$$Re = \frac{\gamma_g d \omega}{g \mu}, \quad (15)$$

где  $\omega$  – скорость движения частиц относительно газового потока, м/с;  $d$  – диаметр частиц, м;  $\gamma_g$  – удельный вес газового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – вязкость газового потока, кг·с/м<sup>2</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения м/с<sup>2</sup>.

Плотность газопламенной струи  $\rho$  определяли, используя уравнение термического расширения газа:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_1}{T_2}, \quad (16)$$

где  $\rho_0$  – плотность горючей смеси при нормальных условиях;  $T_1$  – температура окружающей среды;  $T_2$  – температура пламени.

Для полиамида ПА6, используя результаты исследования процесса газотермического напыления полимеров [6], имеем:  $T_0 = 300 \text{ K}$ ;  $T(0, \tau) = 1,2 \cdot T_{\text{пл}} = 600 \text{ K}$ ;  $\tau = 0,1 \text{ с}$ ;  $\lambda = 0,5 \text{ Вт/(м·град)}$ ;  $a = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Вычисленные значения плотности теплового потока составляют  $1,1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ .

Величина  $\delta(\tau)$  составляет 270 мкм.

Используя выражения (9), получили распределение температуры в слое  $\delta(\tau)$  (рис. 2).

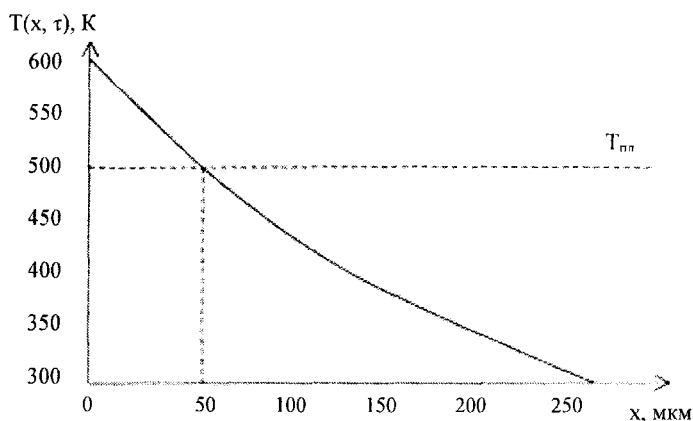


Рис. 2. Распределение температуры по глубине слоя  $\delta(\tau)$

Исходя из полученных данных, определили  $\delta(x) = 50 \text{ мкм}$ .

Результаты расчетов значений величин  $Re$  и  $\xi$  при газопламенном распылении для различных диаметров частиц представлены в таблице [5].

Значение критерия  $Re$  и коэффициента сопротивления  $\xi$  при различных диаметрах частиц  $D$

$D, \text{ мкм}$	$Re$	$\xi$
20	120	1,09
30	180	0,89
40	240	0,77
60	360	0,62
100	600	0,49

Из (16) определили плотность газопламенной струи  $\rho$ , используя значения, полученные в работе [5],  $\rho = 1,5 \text{ кг/м}^3$ .

Определив численные значения всех величин, входящих в выражение (3), была произведена оценка влияния динамики распыляющей струи и физических свойств полимера на размер диспергированных частиц (рис. 3).

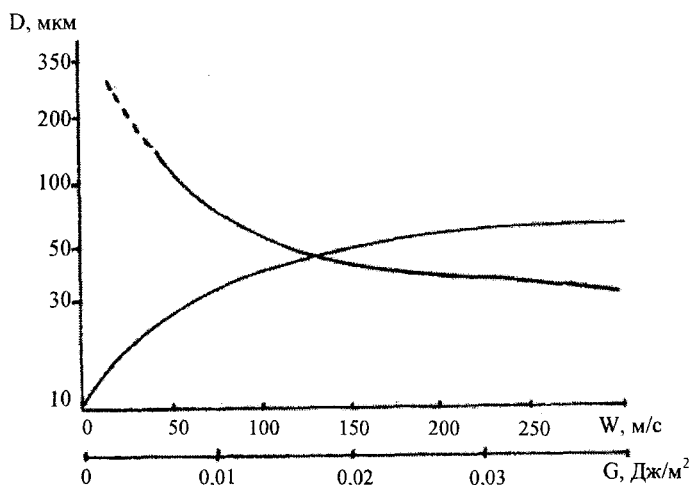


Рис. 3. Зависимость размера диспергируемых частиц от скорости распыляющей струи и физических свойств полимера

**Заключение.** Проведенный анализ показал принципиальную возможность осуществления процесса газопламенного распыления (диспергирования) полимерных экструдатов. При этом использована модель, рассматривающая диспергирование как поочередное распыление тонких поверхностных слоев полимерной проволоки.

Установлено влияние основных технологических параметров процесса на размер образуемых частиц. Показано, что преобладающее влияние на размер частиц диспергируемых экструдатов будет оказывать скорость движения продуктов горения в распыляющем факеле.

Определена плотность теплового потока распыляющего факела ( $\sim 1,1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>), обеспечивающая образование расплавленного слоя толщиной около 50 мкм на полиамидных экструдатах. При этом процесс диспергирования экструдатов начинает осуществляться при скоростях движения продуктов горения более 50 м/с, а максимальный размер образующихся частиц составляет около 100 мкм. Для образования частиц размером 60...80 мкм при распылении экструдатов из полиамида ПАБ скорость потока должна составлять 70...85 м/с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кречмар Э. Напыление металлов, керамики и пластмасс. - М.: Машиностроение, 1966. - 432 с.
2. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров. - М.: Химия, 1976. - 415 с.
3. Петруничев В. А. Получение сфероидизированного порошка распылением проволоки // Известия АН СССР. Металлы. - 1965. - № 2. - С. 48 -53.
4. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. Т. 1. - М.: Высшая школа, 1982. - 327 с.
5. Манойло Е.Д. Повышение основных свойств газопламенных порошковых покрытий путем управления скоростью, температурой и теплосодержанием частиц: Автореф. дис....канд. техн. наук. - Мн.: БГНПК ПМ, 2002.
6. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. - Мн.: Технопринт, 2004. - 200 с.