

УДК 621.793

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕОБХОДИМЫХ ПАРАМЕТРОВ
ГАЗОПЛАМЕННОЙ СТРУИ ПРИ НАПЫЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ****д-р техн. наук М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ***(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)*

Проведен теоретический анализ процесса нагрева полимерного порошка и полимерного шнура в факеле пламени пропано-воздушной смеси. Выполнена теоретическая оценка величины плотности теплового потока при газопламенном напылении порошков из термопластичных полимеров. Рассмотрена физическая модель процесса газопламенного распыления полимерных шнуров. Получено выражение, определяющее связь между теплофизическими, динамическими параметрами струи газа и скоростью подачи полимерного шнура.

Ключевые слова: *газопламенное напыление, порошки термопластичных полимеров, распыление полимерных шнуров, теплофизические параметры факела.*

Введение. Эффективность процесса нанесения полимерных покрытий газопламенными аппаратами зависит от ряда факторов, в том числе от состава исходной горючей смеси, условий ее сжигания, теплофизических свойств напыляемого материала [1–5]. Состав и условия сжигания горючей смеси определяют плотность теплового потока, воздействующего на распыляемые частицы, и в значительной мере оказывают влияние на свойства получаемых покрытий. Эффективное использование энергии, выделяющейся при сгорании горючей смеси, является важнейшей задачей оптимизации процесса напыления покрытий, особенно из таких легкоплавких материалов, как полимеры.

Получение высококачественных газопламенных порошковых полимерных покрытий с заданными свойствами невозможно осуществить без определения рациональных технологических режимов, которые, как правило, устанавливались экспериментальным путем с помощью различных термораспылительных устройств. Причем в известных рекомендациях отсутствует единое мнение как по выбору теплофизических параметров факела, так и по конструкции термораспылителей [6; 7].

К настоящему времени разработаны и широко применяются различные технологии газопламенного напыления покрытий, использующие наносимый материал в виде проволок, гибких шнуров, стержней [8; 9]. Практически все они реализуются по одной принципиальной схеме, основными этапами которой являются: нагрев концевой участка проволоки (стержня) до плавления кольцевым факелом; сдувание и диспергирование расплава газовым (воздушным) потоком; перенос образовавшихся частиц газовым потоком на напыляемую поверхность. Использование известных проволочных термораспылителей, предназначенных для нанесения металлических покрытий, при распылении полимерных шнуров не дало положительных результатов. Это обусловлено, прежде всего, невысокой теплопроводностью полимеров и малой разницей между температурой плавления и температурой деструкции полимера, которая для большинства термопластов не превышает 100...150 °С. Тепло от факела аккумулируется только на поверхности, не проникая во внутренние слои полимера.

Задачи исследований, результаты которых приведены в данной работе:

- определение оптимальной величины плотности теплового потока факела при напылении покрытий из порошков термопластов;
- определение значений теплофизических и динамических параметров струи, распыляющей полимерные шнуры, исключающие деструкцию наносимого материала.

Анализ процесса нагрева полимерных порошков в факеле термораспылителя. При оценке процесса теплообмена между пламенем термораспылителя и напыляемыми частицами полимера в процессе газопламенного напыления (ГПН) были сделаны следующие допущения:

- изменение теплофизических характеристик пламени в поперечном сечении не учитывалось;
- факел пламени считали источником конвективного теплообмена;
- длину ядра пропано-воздушного пламени приняли равной 0,04...0,08 м;
- определяемый удельный поток конвективной теплоотдачи должен проплавливать частицы порошка, но не нагревать их выше $1,5T_{пл}$ (где $T_{пл}$ – температура плавления полимера);
- температура среды T_c , коэффициент теплообмена α , теплоемкость c и удельная теплота плавления λ материала частиц постоянны и не изменяются в процессе их нагрева в пламени;
- пренебрегали радиальной и продольной неоднородностью потока, пространственно временными пульсациями зоны нагрева, абляцией полимерного материала.

Получив выражение для определения коэффициента теплообмена, возникающего при ГПН между поверхностью напыляемой частицы и высокотемпературной средой, и используя его в уравнении теплопроводности параболического типа для сферических частиц [10], получена следующая система уравнений:

$$T(0,5R_{\max}, \tau_{\min}) = \frac{q}{Fo \cdot \alpha} \left\{ Fo - \frac{1}{6} \left[0,75 + \frac{2}{Bi} \right] + A \frac{2 \sin(0,5\mu) \cdot \exp(-\mu^2 \cdot Fo)}{\mu^3} \right\} + T_0 \geq T_{пл};$$

$$T(R_{\min}, \tau_{\max}) = \frac{q}{Fo \cdot \alpha} \left\{ Fo - \frac{1}{6} \left[1 + \frac{2}{Bi} \right] + A \frac{\sin \mu \cdot \exp(-\mu^2 \cdot Fo)}{\mu^3} \right\} + T_0 \leq 1,5T_{пл},$$
(1)

где $T(0,5R_{\max}, \tau_{\min})$ – температура внутри частицы максимального диаметра в процессе напыления с минимальной дистанции, К; $T(R_{\min}, \tau_{\max})$ – температура на поверхности частицы минимального диаметра в процессе напыления с максимальной дистанции, К; q – плотность теплового потока (количество теплоты, проходящее через поверхность частицы), Вт/м²; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К).

Решение системы (1) позволяет вычислить не только оптимальную плотность теплового потока, но и диапазон, в котором должны находиться теплофизические параметры факела пламени, предотвращающие термоокислительную деструкцию полимерной частицы.

Таким образом, выполненный теоретический расчет оптимальной плотности теплового потока при газопламенном напылении полимерных порошков позволяет провести предварительный анализ нагрева частиц полимера и выбрать оптимальные параметры процесса напыления.

Для оценки необходимой и достаточной плотности теплового потока пламени при напылении полимеров с различными теплофизическими характеристиками рассмотрим нагрев частиц следующих полимерных материалов с различными теплофизическими характеристиками: полиэтилентерефталат низкотемпературный (ПЭТФ НТ); полиэтилентерефталат высокотемпературный (ПЭТФ ВТ); сэвилен (сополимер этилена с винилацетатом); полиэтилен высокого давления низкой плотности (ПЭВД); полиамид (ПА-6); фторопласт-3М.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1, результаты расчета представлены в таблице 2 и отображены на рисунке 1.

Таблица 1. – Исходные данные для расчета оптимальной величины плотности теплового потока

Параметр	Ед. изм.	Значение					
		ПЭТФ НТ	ПЭТФ ВТ	Сэвилен	ПЭВД	Полиамид	Фторопласт-3М
Начальная температура частицы T_0	К	293					
Радиус частицы	R_{\min}	50·10 ⁶					
	R_{\max}	350·10 ⁶					
Время нахождения в тепловом потоке	τ_{\min}	0,005					
	τ_{\max}	0,0075					
Коэффициент температуропроводности полимера $a_{пл}$, 10 ⁷	м ² /с	1,1		1,6	2,0	1,2	1,05
Коэффициент теплопроводности полимера $\lambda_{пл}$	Вт/м·К	0,45		0,3	0,5	0,32	0,43
Температура плавления полимера $T_{пл}$	К	383	528	393	398	488	523
Удельная масса полимера ρ	кг/м ³	1409		940	954	1100	2200
Удельная теплота плавления λ	кДж/кг	302		288		270	178
Удельная теплоемкость, с	кДж/кг·К	2,3		2,8		1,7	3,4

Таблица 2. – Необходимые теплофизические параметры факела пламени

Материал частицы	Средняя температура пламени T_c , К	Плотность теплового потока q , Вт/м ²	
		q_{\min}	q_{\max}
ПЭТФ НТ	2200	1,0·10 ⁶	1,2·10 ⁶
ПЭТФ ВТ		2,5·10 ⁶	2,7·10 ⁶
Сэвилен		1,2·10 ⁶	1,3·10 ⁶
ПЭВД		1,4·10 ⁶	1,5·10 ⁶
Полиамид		2,3·10 ⁶	2,4·10 ⁶
Фторопласт-3М		2,4·10 ⁶	2,7·10 ⁶

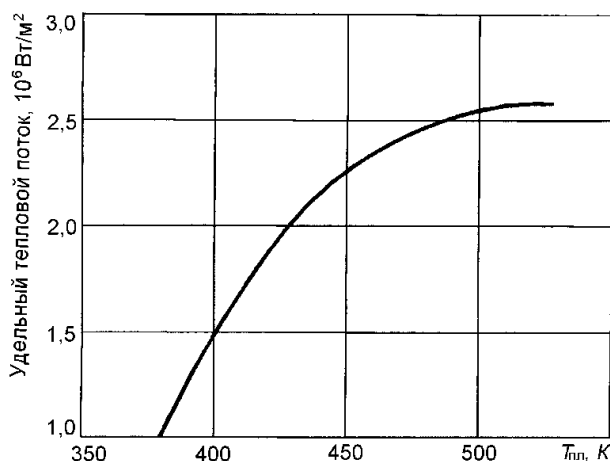


Рисунок 1. – Зависимость удельного потока конвективной теплоотдачи факела пропано-воздушного пламени термораспылителя от температуры плавления напыляемого полимера

Аналитическое описание процесса газопламенного распыления полимерных шнуров. На основании анализа работ по переработке полимерных материалов [1; 3; 11; 12] сформулировано основное требование к процессу газопламенного распыления термопластичных шнуров, которое заключается в том, что плавление необходимо осуществлять при непрерывном удалении с поверхности шнура образующегося слоя расплава. Одним из возможных вариантов реализации этого требования является реализация процесса нагрева и распыления (диспергирования) одной струей газа, обладающей энергией, способной не только расплавлять полимер, но и формировать касательные напряжения (силы трения) на поверхности расплава, превышающие вязкость слоя этого расплава. Таким образом, определение необходимых теплофизических и динамических параметров струи газа – основная задача теоретического анализа процесса распыления полимерных шнуров.

Анализ физической модели процесса газопламенного распыления полимерных проволок показывает, что производительность процесса формирования покрытий и их свойства будут в основном определяться взаимосвязью теплофизических и динамических параметров распыляющей струи газа.

Вследствие специфики свойств термопластичных полимеров энергия газовой струи, передаваемая полимерному шнуру и далее образующемуся расплаву, должна лежать в довольно узком диапазоне. С одной стороны, ее должно быть достаточно для удаления слоя расплава малой толщины, поскольку по мере возрастания толщины слоя расплава поток тепла в расплав полимера и скорость его плавления быстро уменьшаются [11]. С другой стороны, избыток тепловложения приведет к деструкции полимера, что резко снизит качество покрытия, поэтому задаваемое условие – в процессе распыления струя газа не должна нагревать полимер свыше $1,5T_{пл}$. Очевидно, что максимальная температура полимера будет находиться на границе раздела фаз «газ – расплав», причем вследствие низкой теплопроводности полимеров считаем, что все тепло будет аккумулироваться в некотором «тонком» слое δ , причем $\delta \ll r$ (r – радиус распыляемого шнура). Определим необходимые теплофизические и динамические параметры распыляющей струи газа, обеспечивающие максимальную скорость подачи распыляемого шнура без перегрева полимерного расплава, т.е. свыше $1,5T_{пл}$.

Рассмотрим процесс газопламенного распыления полимерного шнура как процесс симметричного продольного обтекания бесконечно длинного цилиндра высокотемпературным газовым потоком (рисунок 2). То есть теплообмен между струей газа и цилиндром с торцевых поверхностей отсутствует.

При этом сделаны некоторые обоснованные допущения:

- 1) гравитационные силы пренебрежимо малы;
- 2) шнур – цилиндр из однородного полимерного материала (теплофизические свойства в продольном и поперечном сечении шнура постоянны);
- 3) образующийся расплав – несжимаемая жидкость;
- 4) изменения теплофизических и динамических параметров распыляющей струи газа в зоне плавления шнура пренебрежимо малы;
- 5) поскольку $\delta \ll r$, распределение температур в слое δ будем определять уравнением теплопроводности как для плоской стенки;
- 6) так как рассматривается повышение температуры слоя расплава, то количество тепла, идущее на фазовые переходы, не учитывается.

Распределение температур в шнуре на участке $L_{пл}$ определяли с помощью уравнения теплопроводности для плоской стенки. Далее, используя интегральный метод теплового баланса [13], находили температуру поверхности шнура и тепловую мощность струи газа. Ограничение тепловой мощности распыляющей струи газа определяется теплофизическими свойствами полимера и временем нахождения (нагрева) полимера в зоне плавления. Для нахождения времени t (при условии, что длина зоны плавления $L_{пл}$ известна) необходимо найти скорость перемещения $V_{пер}$ расплава относительно неподвижной точки «0» начала действия струи газа на шнур в зоне плавления.

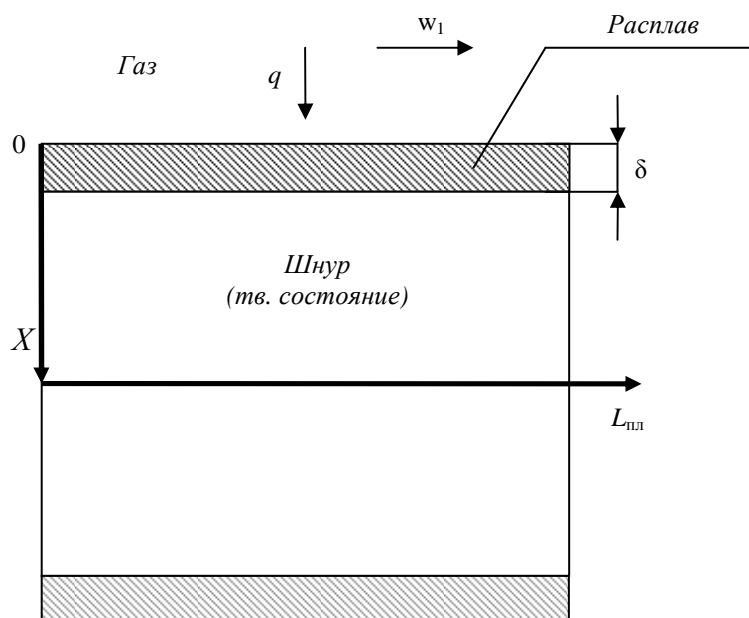


Рисунок 2. – Схема процесса газопламенного расплытия полимерного шнура

На основании сделанных допущений рассмотрим перемещение расплава как течение весьма тонкой пленки вязкой жидкости под действием струи газа, движущегося над ее поверхностью. Скорость перемещения расплава находили с помощью уравнений одномерного движения тонкой пленки (длина волны превышает амплитуду волны), в частности уравнениями пограничного слоя Навье – Стокса [14]. Далее с использованием данных работы [15], посвященной гидродинамическим явлениям в тонких пленках при их «сдувании» турбулентным газовым потоком, получили выражение, определяющее связь между теплофизическими и динамическими параметрами струи газа и скоростью подачи шнура:

$$w_1 = \left[\frac{3q^2 a L_{пл} \mu}{0.03(T_{нов} - T_0)^2 \lambda^2 \rho_1 \left(d - \frac{2qL_{пл}}{c\rho_2 V_{под}} \right) \left(\frac{R_t}{v} \right)^{0.25}} \right]^{\frac{4}{7}} ; \quad (2)$$

$$V_p(w_1, q) = \frac{2q \cdot L}{c \cdot \rho_2 \left(\frac{3q^2 a \cdot L \cdot \mu \cdot R_t^{0.25}}{w_1^{1.75} \cdot T^2 \lambda^2 \rho_1 v^{0.25}} \right)} . \quad (3)$$

Решение проводилось с помощью программного пакета Mathcad (рисунок 3). При этом были использованы следующие справочные значения для полиамида ПА 6 и свойств газа распыляющей струи: $a = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\mu = 10^2 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\lambda = 0,2 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$; $\rho_1 = 1$; $c = 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$; $\rho_2 = 10^3$; $v = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Кроме того, исходя из практики процесса газопламенного напыления, остальные значения были выбраны следующими: $L_{пл} = 0,05 \text{ м}$; $d = 3 \text{ мм}$; $R_t = 5 \cdot 10^{-3}$.

Анализ полученных зависимостей скорости подачи шнура от тепловой мощности и скорости распыляющей струи газа показал, что процесс расплытия необходимо осуществлять с определенной взаимосвязью теплофизических и динамических параметров струи газа.

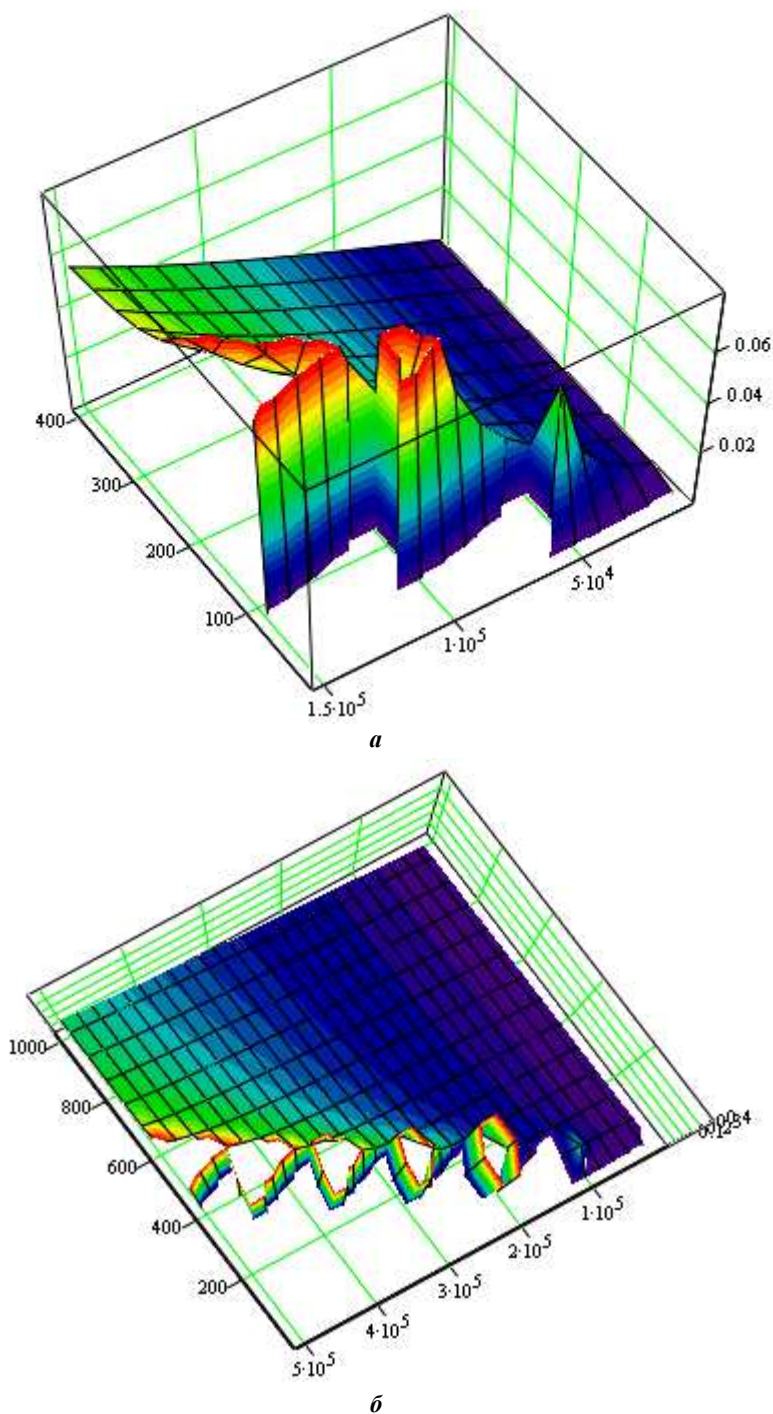


Рисунок 3. – Зависимости скорости подачи шнура от мощности теплового потока (а) и скорости струи в зоне плавления (б)

В связи с тем, что зависимость при определенных параметрах струи газа имеет существенные различия (например, имеет экстремальный характер), ее условно можно охарактеризовать следующими тремя областями (интервалами) значений струи газа, при которых осуществляется распыление:

1) область значений, при которых процесс распыления осуществлять невозможно. По всей видимости, при данных значениях струи газа будет происходить перегрев полимерного слоя в зоне плавления шнура по причине низкой динамической мощности струи газа, вследствие чего процесс распыления шнура будет осуществляться с низким коэффициентом использования материала и измененной химической структурой полимера;

2) область оптимальных значений параметров струи газа, которая характеризуется максимальными скоростями подачи. Наличие данной области можно объяснить тем, что процесс распыления

начинается лишь с определенных значений струи газа, когда формируемые касательные напряжения на поверхности шнура превышают вязкость расплавленного на его поверхности полимерного слоя, однако повышение ее динамической мощности без повышения ее тепловой мощности не приводит к эффективности процесса распыления. То есть с некоторого момента повышение скорости струи газа приводит не к повышению скорости течения расплава, а лишь к его утончению и соответственно возможному перегреву;

3) *область неэффективных значений параметров струи газа.* Она характеризуется избытком динамической мощности струи газа, с повышением скорости струи без повышения тепловой мощности эффективность процесса распыления не увеличивается, что можно связать с низкими тепловыми потоками и, соответственно, с большим временем образования на поверхности шнура слоя необходимой толщины, при которой возможно его течение.

Далее выполнены расчеты по определению необходимой скорости струи газа, обеспечивающей процесс распыления полимерного шнура из полиамида ПА6 диаметром 3 мм при различной тепловой мощности струи газа (таблица 3).

Таблица 3. – Значения скоростей газовой струи, необходимые для распыления шнура из полиамида

Наименование параметра	Тепловая мощность струи, кВт/м ²					
	10	50	100	500	1000	5000
Скорость струи, м/с	5	30...40	72...74	440...480	1·10 ³	(6...7)·10 ³

Анализ результатов расчета скорости подачи шнура из полиамида и производительности процесса напыления для значений тепловых потоков от $5 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^6$ Вт/м² (таблица 3) показывает, что отношение теплового потока распыляющей струи газа к ее скорости распространения в зоне плавления шнура должно удовлетворять значениям $(0,8...1,3) \cdot 10^3$ Вт·с/м³. То есть при повышении тепловой мощности струи газа на каждые 100 кВт/м² необходимо увеличивать скорость ее распространения на 100 м/с. Таким образом, для оценочных расчетов можно записать, что необходимая взаимосвязь плотности теплового потока и скорости струи газа должна удовлетворять следующему выражению:

$$w_1 \approx (0,8...1,3) \cdot \frac{q}{10^3}. \quad (4)$$

Таблица 4. – Расчетные значения скорости подачи шнура и производительности процесса

Показатели процесса ГПН шнурами из полиамида	Тепловая мощность струи, кВт/м ² / скорость струи, м/с					
	10/5	50/35	100/75	500/460	1000/100	5000/6500
Скорость подачи, м/с	–	0,0167	0,033	0,167	0,333	1,66
Производительность, кг/ч	–	0,425	0,85	4,25	8,5	42,5

Сравнение полученных расчетных значений необходимой скорости распыляющей струи (таблицы 3 и 4) с величинами скоростей распыляющих потоков, обеспечиваемыми известными конструкциями установок газопламенного напыления проволочными материалами, показывает, что известное оборудование невозможно использовать для процесса ГПН полимерных шнуров. Распыляющие струи установок ГПН металлических проволок при относительно высокой тепловой мощности (более 10^6 Вт/м²) обладают недостаточными динамическими характеристиками мощности (скорость 100...150 м/с).

Опыт газопламенного напыления полимерных порошковых покрытий свидетельствует о том, что в промышленности используются термораспылительные установки, обеспечивающие, как правило, мощность теплового потока в пределах 500...1000 кВт/м². Из теоретического анализа следует, что в зоне плавления шнура при тепловой мощности струи газа не менее 500 кВт/м² она должна обладать скоростью не менее 440...480 м/с.

Заклучение. Основываясь на том, что газовое пламя с достаточной для практики точностью можно считать конвективным теплообменным источником теплоты, проведен теоретический анализ процесса нагрева полимерного порошка в факеле пламени пропано-воздушной смеси и определен образующийся при взаимодействии частицы и факела удельный поток конвективной теплоотдачи, достаточный для проплавления частиц порошка, но не нагревающий их до температуры деструкции.

Теоретическая оценка величины плотности теплового потока при газопламенном напылении порошков из термопластичных полимеров показала, что для эффективного процесса формирования покрытий из полимеров с различными теплофизическими характеристиками необходим термораспылитель, обеспечивающий управление процессом теплообмена в системе «факел – частица полимера» плавной и точной регулировкой плотности теплового потока в пределах $(1...3) \cdot 10^6$ Вт/м².

Сформулировано основное требование, которому должен удовлетворять процесс ГПН покрытий шнурами из термопластичных полимеров, заключающееся в непрерывном удалении с поверхности шну-

ра образующегося слоя расплава. Одним из возможных технологических вариантов, удовлетворяющих этому требованию, выступает реализация процесса нагрева и распыления (диспергирования) одной струей газа, обладающей энергией, способной не только расплавлять полимер, но и формировать касательные напряжения на поверхности расплава, превышающие вязкость слоя этого расплава.

Выполнено моделирование процесса образования на поверхности шнура слоя расплава и его течение в зоне плавления. Получено выражение, определяющее связь между теплофизическими, динамическими параметрами струи газа и скоростью подачи полимерного шнура. Показано, что для значений тепловых потоков от $5 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^6$ Вт/м² отношение теплового потока распыляющей струи газа к скорости ее движения в зоне плавления шнура должно составлять $(0,8 \dots 1,3) \cdot 10^3$ Вт·с/м³. Расчетным путем установлено, что в зоне плавления шнура из полиамида ПА 6 струей газа с тепловой мощностью около 500 кВт/м² её скорость должна составлять около 500 м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Протасов, В.Н. Теория и практика применения полимерных покрытий в оборудовании и сооружениях нефтегазовой отрасли / В.Н. Протасов. – М. : Недра, 2007. – 374 с.
2. Zhang, T. The influence of process parameters on the degradation of thermally sprayed polymer coatings / T. Zhang, D.T. Gawne, Y. Bao // Surface and Coatings Technology. – 1997. – № 96. – P. 337–344.
3. Thermoplastic Powder Coatings [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dow.com/amplify/fab/thermoplastic.htm>. – Дата доступа: 21.11.2018.
4. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное напыление покрытий порошками полимеров / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 6. – С. 19–23.
5. Polymer Thermal Spray Coatings and Application Techniques // Bulletin Resodyn Corporation : Butte, Montana, USA. – 2013. – 29 p.
6. Довгяло, А.В. Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров. Технологические процессы / А.В. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск : Наука і тэхніка, 1992. – 256 с.
7. Grainger, S. Engineering coatings: Design and application (Second edition) / S. Grainger, J. Blunt. – Sawston, Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2013. – 336 p.
8. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 1998. – 583 с.
9. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. – Минск : Технопринт, 2004. – 200 с.
10. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.
11. Зубов, П.И. Структура и свойства полимерных покрытий / П.И. Зубов, Л.А. Сухарева. – М. : Химия, 1982. – 256 с.
12. Wicks, Z.W. Organic coatings. Science and technology / Z.W. Wicks, F.N., Jones, S.P. Pappas. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd. – 1994. – Vol. 2. – 438 p.
13. Рыкалин, Н.Н. Высокотемпературные технологические процессы: теплофизические основы / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, Л.М. Анищенко. – М. : Наука, 1985. – 176 с.
14. Химическая гидродинамика / А.М. Кутепов [и др.]. – М. : Квантум, 1996. – 336 с.
15. Калинин, В.В. Влияние поверхностных сил на гидродинамику растекания капель жидкости и капиллярные течения : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.02.05 ; РГУ Нефти и газа им. М.М. Губкина / В.В. Калинин. – М., 2002. – 289 с.

Поступила 06.02.2019

ANALYTICAL ASSESSMENT OF NECESSARY PARAMETERS FLAME JET DURING DEPOSITION OF POLYMER COATINGS

M. BELOTSERKOVSKY

The process of heating the polymer powder and the polymer cord in the flame of propane-air mixture is analyzed. A theoretical estimation of the heat flux density during flame spraying of powders from thermoplastic polymers is carried out. The physical model of the process of flame spraying of polymer cords is considered. An expression is obtained that determines the relationship between the thermophysical, dynamic parameters of the gas jet and the feed rate of the polymer cord.

Keywords: flame spraying, powders of thermoplastic polymers, spraying of polymer cords, thermophysical parameters of the torch.