ФИЗИКА

УДК 621.793

АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГАЗОПЛАМЕННОМ ФОРМИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. П.А. ВИТЯЗЬ, канд. техн. наук В.И. ЖОРНИК, канд. техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск); д-р техн. наук, проф. Р.О. АЗИЗОВ, М.Х. САИДОВ (Горно-металлургический институт Таджикистана, Чкаловск)

Исследуются теплофизические процессы при газопламенном формировании полимерных покрытий. Представлены результаты теоретического анализа процессов теплообмена в системе «факел – полимерный порошок – подложка» при газопламенном напылении полимерных покрытий. Определен диапазон величин плотности теплового потока, который должен обеспечивать полимерный термораспылитель. На основании анализа распределения температурного поля в цилиндрических деталях выработаны рекомендации по стабилизации температурного режима при газопламенном напылении полимеров – необходимо выбирать дистанцию напыления, обеспечивающую выдержку заданного температурного интервала.

Введение. В последние годы во всех промышленно развитых странах интенсивно разрабатываются технологии создания композиционных материалов и покрытий на основе полимеров. Полимерные покрытия используются для защиты деталей от коррозии и изнашивания, электрической изоляции и герметизации соединений. Одним из наиболее экономичных и простых методов нанесения полимерных покрытий является газопламенное напыление порошков термопластов. Технология газопламенного напыления полимеров позволяет формировать и оплавлять слой в одной операции и может быть реализована на месте эксплуатации защищаемой конструкции [1, 2].

Использование при напылении в качестве горючего газа пропана, а в качестве окислителя – воздуха является наиболее экономичным способом газопламенного напыления. Однако в этом случае возникает проблема создания факела пламени с теплофизическими параметрами (температурой и плотностью теплового потока), достаточными для эффективного напыления частиц с различными теплофизическими характеристиками.

Эффективное использование энергии, выделяющейся при сгорании горючей смеси, является важнейшей задачей оптимизации процесса горения факела. Кроме того, при напылении полимерных покрытий особое внимание должно уделяться соблюдению температурного режима напыления.

С целью определения рациональных технологических параметров нанесения покрытий были выполнены теоретические и экспериментальные исследования процесса нагрева полимерных частиц, формирующих покрытие, в факеле термораспылителя, определена необходимая величина плотности теплового потока факела, произведен расчет тепловой нагруженности основы при напылении порошков полимерных материалов.

Оценка необходимой величины плотности теплового потока. Одной из основных задач конвективного теплообмена является определение в конкретных условиях коэффициента теплообмена, аналитический расчет которого можно выполнить, используя уравнения теплового баланса. Для этого примем следующие допущения: температура среды T_c , коэффициент теплообмена α , теплоемкость cи удельная теплота плавления λ материала частицы постоянны и не изменяются в процессе движения частицы в пламени, а температура поверхности частицы $T_n = 1,5T_{nn}$.

Количество перенесенного тепла при конвективном теплообмене через поверхность сферической частицы полимера площадью *F*, движущейся в факеле пламени, определяется по закону Ньютона – Рихмана [3]:

$$Q = \alpha \left(T_C - T_\Pi \right) F \tau_{non} \,, \tag{1}$$

где F – площадь поверхности частицы, м² ($F = 4\pi R^2$); R – радиус частицы, м; τ_{non} – время полета частицы до столкновения с подложкой, с.

С другой стороны, количество тепла, полученное частицей при движении в факеле пламени, определяется путем суммирования теплоты, достаточной для нагрева частицы до температуры плавления материала, с количеством теплоты, необходимым для плавления частицы, и количеством теплоты, достаточным для нагрева частицы от температуры плавления до максимально достигаемой температуры.

После преобразований имеем выражение для расчета коэффициента теплообмена в виде:

$$\alpha = \frac{VR\rho(c(1,5T_{nn}-293)+\lambda)}{3(L-l_n)(T_c-1,5T_{nn})}.$$
(2)

Используя полученное выражение, можно определить коэффициент теплообмена, возникающего между поверхностью напыляемой частицы и факелом.

Для нахождения оптимальной величины плотности теплового потока рассмотрим равномерный нагрев сферической частицы радиусом R, движущейся в среде с постоянной температурой T_c со скоростью V в течение времени τ при примерно постоянном коэффициенте теплообмена α . С целью упрощения расчетной модели пренебрегаем радиальной и продольной неоднородностью газотермического потока, пространственно временными пульсациями зоны нагрева и абляцией материала частиц.

При газопламенном напылении нагрев дисперсного материала обусловлен процессом теплообмена сферической частицы порошка с набегающим на нее потоком газа и описывается задачей о нагреве частицы при подводе к ней тепла по закону Ньютона в среде с постоянной температурой. В этом случае термосостояние частиц описывается уравнением теплопроводности параболического типа для сферических частиц следующего вида [4, 5]:

$$\frac{\partial \left[rT(r,\tau) \right]}{\partial r} = a_n \frac{\partial^2 \left[rT(r,\tau) \right]}{\partial r^2}; \quad (\tau > 0; \, 0 < r < R),$$
(3)

где R – радиус частицы, м; τ – время нахождения частицы в тепловом потоке, с; a_n – коэффициент температуропроводности материала частицы, м²/с; α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·K); λ_n – коэффициент теплопроводности материала частицы, Вт/(м·K), $T(r, \tau)$ – температура частицы, К; r – расстояние от центра частицы, м.

Решение уравнения (3) при переходе к безразмерному виду и с учетом того, что для газопламенного напыления полимерных частиц R < 400 мкм, $\lambda_n = 0,1...0,5$ Вт/(м·К), критерий Био принимает малые значения ($Bi \rightarrow 0$), можно представить после некоторых преобразований как

$$T(r,\tau) = K(T_c - T_0) \left[1 - \frac{R \sin\left(\sqrt{3\frac{\alpha R}{\lambda_n} \frac{r}{R}}\right)}{r\sqrt{3\frac{\alpha R}{\lambda_n}}} \exp\left(-3\frac{\alpha a_n \tau}{\lambda_n R}\right) \right] + T_0.$$
(4)

Здесь K – коэффициент, учитывающий неоднородность газопламенного потока (K = 0,75...1,5).

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 HT);
- полиэтилентерефталат высокотемпературный (ПЭТФ ВТ);
- сэвилен (сополимер этилена с винилацетатом);
- полиэтилен высокого давления низкой плотности (ПЭВД);
- полиамид (ПА-6);
- фторопласт-3М.

Используя числовые значения физических констант этих полимеров, приведенные в работах [6 – 11], были определены необходимые теплофизические параметры факела (рис. 1).

Из данных проведенных расчетов следует, что для эффективного процесса газопламенного напыления полимерных материалов с различными теплофизическими характеристиками необходим термораспылитель, обеспечивающий управление процессом теплообмена в системе «факел – частица полимера» плавной и точной регулировкой плотности теплового потока q в пределах (1...3)·10⁶ Вт/м².



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

Расчет тепловой нагруженности основы. При реализации процесса газопламенного напыления полимерных покрытий особое внимание должно уделяться соблюдению температурного режима напыления. При этом температура основы в процессе напыления должна поддерживаться в достаточно узком диапазоне, поскольку напыляемый полимерный материал должен разогреваться до температуры, с одной стороны, обеспечивающей его растекание по поверхности основы, а с другой – не допускающей «сползания» полимерного покрытия с напыляемой поверхности и его деструкции. Наиболее высокие физикомеханические свойства полимерных покрытий, нанесенных газопламенным напылением, получаются при напылении на относительно коротких дистанциях (200...250 мм) [12 – 16], при этом тепловой поток от факела в верхний слой уже осевших на подложку частиц может быть соизмерим с тепловым потоком от этих частиц в основной металл.

При нанесении полимеров с относительно низкой температурой плавления, что приводит к значительному увеличению времени застывания частиц на подложке, возможны расплавление и выдувание покрытия струей распыляющего газа. При этом на максимальную толщину слоя, который можно нанести без перегрева за один проход горелки, большое влияние оказывают дистанция напыления L_n , температура поверхности основы T_n и плотность теплового газополимерного потока Q_{men} (рис. 2), регулируемая в термораспылителе расходом горючего газа $G_{гор}$, соотношением расхода горючего газа, газа-окислителя β и расходом газа активирующего потока $G_{aкm}$.



Рис. 2. Взаимосвязь толщины полимерного покрытия, формируемого за один проход горелки, с максимально допустимой температурой подложки при плотности теплового потока $Q_{\text{теп}} = 1,0\cdot 10^6 \text{ Br/m}^2$ (1; 1'; 1"); 1,5 · 10⁶ Br/m² (2; 2'; 2"); 2,2 · 10⁶ Br/m² (3; 3'; 3") и дистанции напыления $L_{\mu} = 200 \text{ мм}$ (1; 2; 3); 250 мм (1'; 2'; 3'); 300 мм (1"; 2"; 3")

Указанная на рисунке 2 предельная толщина покрытия из полиэтилентерефталата, нанесенного без перегрева за один проход при различных режимах работы термораспылителя, определялась напылением на подогреваемый образец из стали 3 с наружным диметром 70 мм, внутренним диаметром 60 мм и длиной 120 мм, температура поверхности которого контролировалась хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром ПП-63. Снижение максимально допустимой температуры подложки при увеличении толщины покрытия объясняется экранированием поверхности основы ранее осевшими частицами, обладающими низкой теплопроводностью, и соответствующим повышением контактной температуры для последующих слоев частиц.

Таким образом, при дистанциях напыления порядка 200...250 мм возможно нарушение нормального процесса формирования полимерного покрытия даже при незначительном повышении температуры подложки. В связи с этим важно установить характер нагрева изделия при нанесении полимерного покрытия, а также определить конкретные технологические способы стабилизации температурного режима.

При напылении покрытий на длинномерные детали (элементы металлоконструкций, трубы, направляющие станков и т.п.) тепловое состояние напыляемой поверхности определяется не только процессами



Рис. 3. Расчетная схема для определения температурного поля в полом ограниченном цилиндре

передачи тепловой энергии от газовой горелки через пятно напыления, но и процессами распространения тепла в самой основе по механизму теплопроводности. Накопление тепловой энергии в основе вызывает нарушение температурных параметров напыления, оказывает влияние на протекание физико-химических процессов в зоне контакта покрытия и основы, что вызывает необходимость оценки процессов теплопередачи в основе при напылении полимерных покрытий и корректировки технологических режимов напыления по мере перемещения горелки вдоль оси детали.

При моделировании тепловых процессов в длинномерных трубных элементах, подвергаемых газопламенному напылению наружных поверхностей, рассматривалась тепловая задача в такой постановке. По наружной поверхности ограниченного полого цилиндра движется по винтовой линии источник тепла $B(\varphi, z, t)$, имеющий длину *h* и угловую ширину β (рис. 3). Требуется найти распределение температуры $T(r, \varphi, z, t)$.

Для упрощения расчета теплофизические характеристики материала цилиндра принимаются постоянными,

теплообмен с окружающей средой отсутствует. Тогда уравнение теплопроводности в неподвижной системе координат запишется в виде:

$$\frac{\partial T(r,\varphi,z,t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(r,\varphi,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,\varphi,z,t)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 T(r,\varphi,z,t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T(r,\varphi,z,t)}{\partial z^2} \right),$$
(5)
$$R_1 \le r \le R_2, \ 0 \le \varphi \le 2\pi, \ 0 \le z \le 1$$

при начальном условии

$$T(r,\varphi,z,t)_{|t=0} = A(r,\varphi,z)$$
(6)

и граничных условиях:

$$\frac{\partial T(r,\varphi,z,t)}{\partial z}\Big|_{z=0} = \frac{\partial T(r,\varphi,z,t)}{\partial z}\Big|_{z=l} = \frac{\partial T(r,\varphi,z,t)}{\partial r}\Big|_{r=R_{\rm I}} = 0, \qquad (7)$$

$$\frac{\partial T(r,\varphi,z,t)}{\partial r}_{|r=R_2} = Q(\varphi,z,t) = \frac{1}{\lambda} B(\varphi,z,t) \delta(\varphi,z,t), \qquad (8)$$

где

$$\delta(\varphi, z, t) = \begin{cases} 0, & \Pi pu \begin{cases} \omega t \ge \varphi \ge \omega t + \beta, \\ \upsilon t \ge z \ge \upsilon t + h; \\ 1, & \Pi pu \end{cases} \begin{cases} \omega t \le \varphi \le \omega t + \beta, \\ \upsilon t \le z \le \upsilon t + h. \end{cases}$$
(9)

Решение задачи (5)...(9) осуществляли, применяя тройное интегральное преобразование вида:

$$\overline{\overline{T}}(\mu_{nk},n,m,t) = \int_{R_1}^{R_2} r U_{nk}\left(\mu_{nk} \frac{r}{R_2}\right) dr \int_{-\pi}^{\pi} e^{-in\varphi} d\varphi \int_{0}^{\ell} \cos(p_m z) T(r,\varphi,z,t) dz , \qquad (10)$$

где

$$U_{nk}\left(\mu_{nk}\frac{r}{R_{2}}\right) = \left[\frac{n}{\mu_{nk}d_{0}}Y_{nk}\left(\mu_{nk}d\right) - Y_{n+1,k}\left(\mu_{nk}d_{0}\right)\right] \times J_{nk}\left(\mu_{nk}\frac{r}{R_{2}}\right) - \left[\frac{n}{\mu_{nk}d_{0}}J_{nk}\left(\mu_{nk}d_{0}\right) - J_{n+1,k}\left(\mu_{nk}d_{0}\right)\right] \cdot Y_{nk}\left(\mu_{nk}\frac{r}{R_{2}}\right);$$
(11)

 $d = \frac{R_{1}}{R_{2}}, \ \rho_{m} = \frac{m\pi}{\ell}, \ \mu_{00} = 0, \ U_{00} = 1; \ \mu_{nk} - \text{корни уравнения:} \\ \left[\frac{n}{\mu_{n}d_{0}}Y_{n}(\mu_{n}d_{0}) - Y_{n+1}(\mu_{n}d_{0})\right] \cdot \left[\frac{n}{\mu_{n}}J_{n}(\mu_{n}) - J_{n+1}(\mu_{n})\right] - \\ - \left[\frac{n}{\mu_{n}d_{0}}J_{n}(\mu_{n}d_{0}) - J_{n+1}(\mu_{n}d_{0})\right] \cdot \left[\frac{n}{\mu_{n}}Y_{n}(\mu_{n}) - Y_{n+1}(\mu_{n})\right] = 0$ (12)

(при $n \neq 0, k = 1, 2, 3...;$ при n = 0, k = 0, 1, 2, 3...).

При газопламенном напылении распределение удельного теплового потока газополимерного потока по площади нагрева может быть описано законом нормального распределения:

$$q(r) = q_0 \exp\left(-\xi r^2\right). \tag{13}$$

Для упрощения расчета нормальный круговой источник в нашем случае заменен нормальнополосовым образом, чтобы суммарный тепловой поток остался неизменным. При этом функция $B(\varphi, z, t)$ имеет вид:

$$B(\varphi, z, t) = q_0 \exp\left[-b\left(z - \left(\frac{h}{2} + \upsilon t\right)\right)^2\right],\tag{14}$$

где $q_0 = q'_0 + q''_0$ – наибольший удельный тепловой поток на оси струи; q'_0 – удельный тепловой поток от струи распыляющего газа; q''_0 – удельный тепловой поток от частиц напыляемого материала; b – коэффициент сосредоточенности теплового потока. При этом $b = 12/q_n^2$; D_n – диаметр пятна нагрева. В нашем случае диаметры пятен нагрева от разных источников (струя распыляющего газа, поток частиц) в исследуемом диапазоне дистанций напыления (150...250 мм) отличаются незначительно. Поэтому в расчетах было принято для источника нагрева $h = d_n$, при этом его ширина, определенная с учетом равенства суммарных тепловых потоков, составила $\beta R_2 = 0,72h$.

Учитывая нормально-полосовой закон распределения теплового потока вида (14) и принимая начальное распределение температуры в цилиндре постоянным $A(r, \varphi, z) = T_0$, получаем:

$$T(r, \varphi, z, t) = \frac{1}{\sqrt{\pi\ell}} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} K_{nk} U_{nk} \left(\mu_{nk} \frac{r}{R_2} \right) Q \cdot V \left[A_{nk} (\varphi, t) \operatorname{erf} \left(\sqrt{b} \frac{h}{2} \right) + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\infty} K_m C_{nkm} (\varphi, t) \cos(p_m z) \right] + \frac{1}{R_2^2 (1 - d_0^2)} \left[T_0 \sqrt{\pi\ell} \left(R_2^2 - R_1^2 \right) + \beta Q \left(t \cdot \operatorname{erf} \left(\sqrt{b} \frac{h}{2} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} K_m B_{om} (t) \cos(p_m z) \right) \right] + (15) + \frac{1}{2} K_{ok} U_{ok} \left[\sum_{m=1}^{\infty} + \sum_{k=1}^{\infty} K_{ok} U_{ok} \left(\mu_{ok} \frac{r}{R_2} \right) \beta Q \cdot \left[\frac{\operatorname{erf} \left(\sqrt{b} \frac{h}{2} \right) R_2^2}{a \mu_{ok}^2} \left(1 - \exp \left(-a \frac{\mu_{ok}^2}{R_2^2} t \right) \right) + \sum_{m=1}^{\infty} K_m B_{km} (t) \cos(p_m z) \right] \right\}.$$

Расчет значений функции $T(r, \varphi, z, t)$ проводился в среде Matlab 7.0 R13 с применением инженерных пакетов для расчета показательной функции, тригонометрических функций, функций Бесселя, функций ошибок Гаусса и корней трансцендентного уравнения. Численные расчеты выполнялись для случая нанесения разработанным термораспылителем покрытий толщиной δ , равной 0,5, 1,0 и 1,5 мм, на стальную трубу (полый цилиндр) с размерами $R_1 = 145$ мм, $R_2 = 150$ мм и $\ell = 1500$ мм для различных точек, расположенных на напыляемой поверхности.

Наибольший тепловой поток на оси газополимерной струи $q_0 = f(L_n, G_{cop}, \beta, G_{akm})$, зависящий от дистанции напыления, расхода горючего газа, соотношения расходов горючего газа и газа-окислителя β , расхода газа активирующего потока, определялся экспериментально с помощью локального калориметрического зонда.

Коэффициент сосредоточенности теплового потока *b*, зависящий от дистанции напыления, определяли замером параметров отделенной от плоской основы полимерной «горки», полученной при неподвижном положении горелки относительно напыляемой поверхности, расходе горючего газа $G_{zop} = 1,10 \text{ м}^3/\text{ч}$, соотношении расходов горючего газа и газа-окислителя β 22, расходе газа активирующего потока $G_{axm} = 1,20 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рис. 4).



Рис. 4. Влияние дистанции напыления на удельный тепловой поток на оси газополимерной струи и коэффициент сосредоточенности теплового потока при расходе горючего газа $G_{cop} = 1,10 \text{ m}^3/\text{ч}$: сплошные линии (1...3) – удельный тепловой поток; пунктирная линия – коэффициент сосредоточенности теплового потока

Температура для выбранных точек основы рассчитывалась для момента времени t_n , когда центр пятна нагрева источника не доходил до этих точек на расстояние, равное $\beta R_2/2$, т.е. по существу определялась температура поверхности основы к моменту нанесения покрытия.

По мере продвижения источника вдоль оси цилиндра напыления впереди пятна нагрева за счет теплопроводности материала основы происходит накопление тепла, вследствие чего температура основы в точке «набегания» газополимерной струи со временем повышается (рис. 5), что может привести к перегреву наносимого слоя на заключительных этапах напыления полимера и выдуванию покрытия. Различие времени напыления покрытия для различных дистанций напыления при этом объясняется уменьшением коэффициента использования материала с увеличением дистанции напыления, т.е. возникает необходимость в уменьшении скорости подачи горелки.

Для стабилизации температурного режима процесса напыления необходимо выбирать дистанцию напыления, обеспечивающую выдержку заданного температурного интервала. Для этой цели служит зависимость перепада температуры $\Delta T = T_1 - T_2$ (T_1 и T_2 – соответственно температура в точке к моменту времени t_n на начальном и заключительном этапах напыления) от дистанции напыления (рис. 6). Приведенные зависимости дают возможность выбирать минимальное значение дистанции напыления при данных параметрах напыления полимерного материала. Максимальное значение L_n ограничивается коэффициентом использования материала, который падает с увеличением L_n , а также снижением физикомеханических свойств покрытия. Обычно L_{nmax} лежит в пределах 240...290 мм [16].

Для получения высокоплотных полимерных слоев целесообразно осуществлять формирование покрытий газопламенным напылением на короткой дистанции (200...250 мм). При этом можно регулировать температурный режим основы путем ее принудительного охлаждения или уменьшения тепловой мощности струи. Если эти меры неприемлемы, необходимо увеличивать дистанцию напыления.



Рис. 5. Изменение температуры поверхности основы при нанесении полимерного покрытия толщиной 0,5 мм при различных дистанциях напыления: $1 - L_{\mu} = 200$ мм; $2 - L_{\mu} = 250$ мм; $3 - L_{\mu} = 300$ мм



Рис. 6. Влияние дистанции напыления на величину перепада температуры по длине детали при различной толщине наносимого покрытия: $1 - \delta = 0,5$ мм; $2 - \delta = 1,0$ мм; $3 - \delta = 1,5$ мм

Полученные расчетные соотношения удовлетворительно согласуются с данными эксперимента, при этом погрешность не превышает 12 %.

Проведенные расчеты использованы при разработке технологических процессов газопламенного напыления коррозионно-стойких полимерных покрытий на трубные элементы металлоконструкций, нефте- и газопроводов.

Заключение

Аналитическим путем установлено, что для эффективного процесса газопламенного напыления термопластичных полимерных материалов необходим термораспылитель, обеспечивающий управление процессом теплообмена в системе «факел – частица полимера» регулировкой плотности теплового потока q в пределах (1...3)·10⁶ Вт/м². Получено выражение для расчета температурного поля в конечном полом цилиндре при движении по винтовой линии по его наружной поверхности нормально-полосового источника тепла, учитывающего суммарное тепловложение в основу от газополимерной струи.

На основании теоретического рассмотрения распределения температурного поля в конечном полом цилиндре выработаны рекомендации по стабилизации температурного режима при газопламенном напылении полимерных покрытий на наружную поверхность трубных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Теория и практика газопламенного напыления / П.А. Витязь [и др.]. Минск: Навука і тэхніка, 1993. 295 с.
- 2. Витязь, П.А. Упрочнение газотермических покрытий / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский. Минск: Бестпринт, 2004. 192 с.
- 3. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергия, 1969. 440 с.
- 4. Теоретическая оценка времени нагрева частиц порошка при газотермическом нанесении покрытий / Н.Н. Дорожкин [и др.] // Доклады Академии наук БССР. 1989. Т. XXXIII, № 1. С. 44 47.
- 5. Теплофизика формирования газотермических покрытий. Состояние исследований / Н.М. Фиалко [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 1993. № 4. С. 89 93.
- 6. Гнедовец, А.Г. Теплообмен сферической частицы с газом при произвольных числах Кнудсена и перепадах температуры в пограничном слое / А.Г. Гнедовец, Е.М. Иванов, А.А. Углов // Теплофизика высоких температур. 1986. № 3. С. 544 548.
- 7. Родченко, Д.А. Особенности нагрева дисперсного политетрафторэтилена в низкотемпературной плазменной струе / Д.А. Родченко, М.И. Петроковец, А.И. Баркан // Изв. АН БССР. Сер. физикотехнических наук. – 1983. – № 9. – С. 52 – 56.
- 8. Ковальков, А.Н. Математическое моделирование процесса нагрева полимерных частиц при распылении плазменной струей / А.Н. Ковальков, А.И. Баркан, Д.А. Родченко // Инженерно-физический журнал. 1991. Т. 51, № 5. С. 756 762.
- 9. Рыкалин, Н.Н. Высокотемпературные технологические процессы: Теплофизические основы / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, Л.М. Анищенко. М.: Наука. 1985. 176 с.
- 10. Барановский, В.М. Теплофизические свойства модифицированных полимеров / В.М. Барановский. Киев: КГПИ, 1983. 126 с.
- 11. Пивень, А.Н. Теплофизические свойства полимерных материалов: справочник / А.Н. Пивень, Н.А. Гречаная, И.И. Чернобыльский. Киев: Вища школа, 1976. 180 с.
- 12. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное напыление покрытий порошками полимеров / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 6. С. 19 23.
- Белоцерковский, М.А. Использование эффекта газодинамической активации факела при разработке конструкции полимерного термораспылителя / М.А. Белоцерковский, И.Л. Пунтус, А.В. Федаравичус. – Деп. В ВИНИТИ 05.02.2002 № 228-В2002 // Весці НАН Беларуси. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 3. – С. 121.
- Сергеев, В.А. Экспериментальное исследование нагрева затупленных тел потоком плазмы / В.А. Сергеев, Г.М. Безладнов, В.Д. Ляшкевич // Инженерно-физический журнал. – 1971. – Т. ХХ, № 4. – С. 49 – 54.
- Газотермические металлополимерные покрытия / А.З. Скороход [и др.] // Разработка и применение технологии, оборудования и материалов для газотермических процессов нанесения защитных покрытий: тез. докл. конф. – Минск, 1990. – С. 13.
- 16. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. Минск: Технопринт, 2004. 200 с.

Поступила 09.01.2008