



УДК 669.017;539.213

В. Ю. Процко, Д. Л. Стасенко

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ, ОБРАЗУЕМОЙ ЕДИНИЧНОЙ КАПЛЕЙ РАСПЛАВА ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЗАГОТОВКИ

Во введении представлены физические основы газотермического напыления и отмечена необходимость определения параметров процесса на получаемые покрытия. Анализ формирования пленки из капли расплава является важной задачей, обуславливающей формирование эксплуатационных свойств получаемого покрытия. Цель исследования – определение толщины пленки покрытия единичной капли при газотермическом напылении на поверхности вращающейся заготовки. Научная новизна работы заключена в установлении зависимости для нахождения конечных размеров растекающейся по поверхности вращающейся заготовки капли расплава, т.е. пленки затвердевшего металла. В основной части показано, что процесс растекания капель расплава по твердой поверхности делится на три последовательные стадии: на начальной стадии капля под воздействием капиллярных сил и силы тяжести превращается в плоскую «лужицу», затем происходит дальнейшее растекание жидкости со степенной зависимостью расстояния от времени, на последней стадии скорость растекания быстро уменьшается и растекание прекращается. Выведена зависимость для определения толщины образуемой единичной каплей расплава с учетом ее кинетической энергии, сил трения при растекании и без учета изменения температуры при кристаллизации. Результаты исследования представлены на рисунке 1 в виде графиков. В заключении изложены результаты анализа зависимости конечных размеров растекающейся по поверхности вращающейся заготовки капли расплава от исходных размеров капли при различных скоростях ее полета. Установлено, что для получения наименьшей толщины единичного элемента покрытия необходимо, чтобы исходные размеры капель, попадающих на поверхность вращающейся заготовки, были минимальными, а скорость их полета – максимальной, причем с увеличением размера капли влияние скорости на толщину покрытия увеличивается. Область применения полученных результатов работы – восстановление и упрочнение поверхностей деталей машин при газотермическом напылении.

**Ключевые слова:** газотермическое напыление, толщина покрытия, скорость растекания расплава, капля расплава, вращающаяся заготовка.

**Введение.** Газотермический метод формирования покрытий заключается в нагреве исходного материала покрытия до жидкого состояния и его распылении газовой струей. Напыляемый материал поступает на обрабатываемую поверхность в виде потока жидких капель, которые при соударении закрепляются на поверхности детали, образуя покрытие. Исходный материал покрытия подается в высокотемпературный газовый поток в виде проволоки (прутка) или порошка. Во всех процессах газотермического напыления в высокотемпературном потоке газа напыляемый материал ускоряется, нагревается, плавится и в виде потока жидких капель при ударном взаимодействии с обрабатываемой поверхностью формирует покрытие [1; 2].

**Процко Виолетта Юрьевна**, аспирант каф. технологии машиностроения ГГТУ им. П. О. Сухого (Беларусь); науч. рук. – Д. М. Стасенко, канд. техн. наук, доц., зав. каф. технологии машиностроения ГГТУ им. П. О. Сухого (Беларусь).

**Адрес для корреспонденции:** пр-т Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь; e-mail: viyaletaprotkska@gmail.com

**Стасенко Дмитрий Леонидович**, канд. техн. наук, доц., зав. каф. технологии машиностроения ГГТУ им. П. О. Сухого (Беларусь).

**Адрес для корреспонденции:** пр-т Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь; e-mail: stasenko@gstu.by

При газотермическом напылении источником тепловой энергии является пламя, образующееся в результате горения смеси, кислорода и горючего газа (ацетилена, метана и др.). При электродуговом и плазменном напылении источником тепла является электрическая дуга, горящая между электродами в потоке газа.

Напыление покрытий происходит в следующем порядке: расплавление наплавляемого материала, ускорение и распыление расплавленного материала, полет напыляемых частиц в направлении к обрабатываемой поверхности, удар частиц и их сцепление с поверхностью обрабатываемого изделия.

Свойства газотермических покрытий можно представить в виде взаимосвязанных подсистем, определяющих их геометрические параметры, теплофизические и структурные характеристики, прочность, остаточные напряжения. Эти свойства, в свою очередь, зависят от характеристик транспортирующего газа, распыляемого материала, энергетических параметров источника нагрева, а также от внешних воздействий на процесс газотермического напыления [1; 2].

Управление технологическими факторами при газотермическом напылении основывается на изучении механики, гидродинамики и теплофизики процессов формирования покрытий, поэтому проведение теоретических и экспериментальных исследований процесса растекания расплава по поверхности вращающейся заготовки, базирующейся на установлении функциональных взаимосвязей между технологическими параметрами процесса, является важной и актуальной задачей, имеющей как научное, так и техническое значение. Все перечисленные стадии непосредственно зависят от химического состава расплава, который, в свою очередь, определяет механические свойства полученного покрытия. Поэтому анализ формирования пленки из капли расплава является важной задачей, обуславливающей формирование эксплуатационных свойств получаемого покрытия.

Цель работы заключается в определении толщины пленки покрытия единичной капли при газотермическом напылении на поверхности вращающейся заготовки.

**Основная часть.** По поверхности твердых тел жидкие металлы могут растекаться в виде фазового жидкого слоя и путем поверхностной диффузии атомов.

В первом приближении необходимым условием растекания расплава по поверхности твердого тела является выполнение известного неравенства  $\sigma_H \geq \sigma_l + \sigma_{H-P}$  где  $\sigma_H$ ,  $\sigma_l$ ,  $\sigma_{H-P}$  – свободные поверхностные энергии твердого тела, расплава на границе с окружающей средой и на их границе друг с другом [1].

Данное соотношение не дает точный ответ на вопрос, будет ли расплавленный металл растекаться по поверхности твердого тела, так как в реальных условиях свободная поверхностная энергия  $\sigma_H$  и  $\sigma_{H-l}$  может изменяться в широких пределах вследствие взаимодиффузии компонентов, изменения химического состава и структуры поверхностного слоя. Кроме того, это соотношение не учитывает микрорельеф твердой поверхности, который играет большую роль в явлениях смачивания и растекания. Хорошее смачивание твердых тел расплавленными металлами является необходимым, но недостаточным условием растекания расплава на твердой поверхности. Смачивание происходит в тех бинарных системах (жидкий металл – твердая подложка), где при температуре эксперимента образуются интерметаллиды или твердые растворы, в противном случае смачивания не происходит даже при хорошей растворимости металла кристаллизатора в жидком расплаве. Представляет большой интерес связь между возможностью растекания и отношением атомных радиусов жидкого и твердого металлов  $k$ .

Зависимость возможности растекания жидких металлов и соотношения атомных радиусов, по-видимому, связано с тем, что на границе фаз  $H-l$  происходит перестройка расположения атомов к положению, отвечающему минимуму свободной энергии. Связи в жидкой фазе слабее, чем в твердом металле, что обуславливает более сильное искажение расположения атомов, причем межфазная энергия подрастает по мере увеличения степени искаженности (увеличение отношения  $k$ ).

Геометрия твердой поверхности оказывает существенное влияние на величину краевых углов при ограниченном смачивании и на возможность растекания жидкого металла по поверхности вращающейся заготовки. Причины влияния микрорельефа на смачивание

впервые были объяснены Р. Венцелем и Б. В. Дерягиным. Основная идея данных работ заключается в том, что микрорельеф поверхности тела приводит к увеличению его фактической поверхности по сравнению с идеально гладкой поверхностью [3–5].

Краевой угол смачивания на шероховатой поверхности определяется соотношением  $\cos\theta_0 = k_{sh} \cdot \cos\theta_0$ , где  $\theta_0$  – краевой угол жидкости на идеально гладкой поверхности;  $k_{sh}$  – коэффициент шероховатости (отношение истинной поверхности тела к ее проекции на горизонтальную гладкую поверхность).

При значительной шероховатости поверхности твердого тела возможен переход от ограниченного смачивания к растеканию, если  $\theta_0 < 90^\circ$ . Вместе с тем роль микрорельефа поверхности твердого тела на смачивание и растекание жидких металлов нельзя считать полностью выясненной, так как при одинаковом значении  $k_{sh}$  структура поверхности может быть различной.

Растекание по шероховатой поверхности происходит лишь вдоль канавок с острым двугранным углом при вершине, и возможность растекания зависит от наличия на поверхности микродефектов определенной геометрии, а не от интегрального коэффициента шероховатости [3].

Процесс растекания капель расплавов по твердой поверхности (рисунок 1) делится на три последовательные стадии: на начальной стадии капля под воздействием капиллярных сил и силы тяжести превращается в плоскую «лужицу», затем происходит дальнейшее растекание жидкости со степенной зависимостью расстояния от времени, на последней стадии скорость растекания быстро уменьшается и растекание прекращается. На второй стадии растеканию расплава препятствует главным образом вязкое сопротивление жидкого металла, на который расходуется запас свободной поверхностной энергии [6].

$$X = \left( \frac{3m_l \Delta\sigma_l}{2\eta_l \rho_l \xi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot t^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

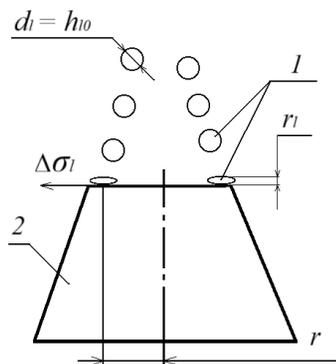
где  $X$  – расстояние от центра капли с массой  $m_l$ ;  $\eta_l$ ,  $\rho_l$  – вязкость и плотность жидкого металла;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий неоднородность толщины слоя расплава ( $\xi = 10$ ).

Процесс растекания капли расплава условно можно разделить на два этапа: кинематический и диффузионный. При кинематическом этапе происходит перемещение периметра смачивания под действием тянущего усилия  $\Delta\sigma_p$ , а второй этап характеризует доставку массы жидкости к периметру смачивания за счет объемных сил.

Скорость растекания характеризуется радиусом круга  $r$ , который увеличивается во времени, а скорость смачивания характеризуется уменьшением угла контакта капли с поверхностью вращающейся заготовки, т.е.

$$r^n = a_n \cdot t,$$

где  $n$  – показатель, характеризующий режим растекания;  $t$  – время;  $a$  – ускорение.



Пояснения: 1 – капли расплава; 2 – поверхность вращающейся заготовки.

**Рисунок 1 – Схема контакта и растекания расплава по поверхности вращающейся заготовки**

*Процко В. Ю., Стасенко Д. Л.* Определение толщины покрытия, образуемой единичной каплей расплава при газотермическом напылении поверхности вращающейся заготовки (С. 6–14)

При изотермическом процессе термодинамическая сила  $\Delta\mu_l$  определяет тянущее усилие  $\Delta\sigma_l$  на периметре смачивания:

$$\Delta\mu_l = \Delta\sigma_l = \sigma_H - \sigma_{H-l} - \sigma_l \cdot \cos\theta. \quad (2)$$

Скорость перемещения жидкого металла с учетом выражения (2) описывается следующим уравнением:

$$V_l = k_p \cdot \Delta\sigma_l, \quad (3)$$

где  $k_p$  – коэффициент пропорциональности, определяемый в начальный момент по скорости растекания  $V_0$  и угле смачивания  $\theta = \theta_0$ . С учетом уравнения Юнга соотношение для радиуса растекания жидкого металла примет вид

$$\Delta\sigma_l = \sigma_l \cdot (\cos\theta_0 - \cos\theta). \quad (4)$$

Используя соотношения (2) и (3), можно оценить величину скорости растекания капель жидких металлов по поверхности вращающейся заготовки, а также режимы смачивания. Теоретический анализ полной системы уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости [3] показывает, что кинетика растекания тонкого слоя при  $\delta \ll r$  расплава описывается следующим соотношением:

$$r = \left( \frac{4\Delta\sigma_l m_l}{\pi\eta_l \rho_l \alpha} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot t^{\frac{1}{4}}, \quad (5)$$

где  $\Delta\sigma_l = k_{sh} \cdot (\sigma_H - \sigma_l) - \sigma_p$ ,  $k_{sh}$  – коэффициент шероховатости подложки;  $m_l$  – масса капли расплава;  $\mu_p$ ,  $\rho_l$  – вязкость и плотность расплава;  $\delta$  – толщина слоя;  $\alpha > 1$  – поправочный коэффициент, учитывающий повышение гидравлического сопротивления слоя.

Соотношение (5) справедливо при выполнении условий квазистационарности ( $t \gg \frac{\rho_l \delta^2}{\eta_l}$ ) и безынерционности ( $Re \ll \frac{r}{\delta}$ ).

Из соотношения (4) следует, что скорость перемещения фронта жидкости

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\Delta\sigma_l m_l}{\pi\alpha\eta_l \rho_l} \cdot \frac{1}{r^3} \cdot \frac{\Delta\sigma_l C_s \sqrt{D_v \pi}}{2\alpha\eta_l \rho_l} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\rho_l}, \quad (6)$$

где  $D_v$  – коэффициент объемной диффузии расплава в тело вращающейся заготовки;  $C_s$  – концентрация диффундирующего вещества расплава в поверхностный слой вращающейся заготовки.

Так как уравнение (6) является нелинейным, аналитического решения для него не существует. Для решения уравнения (6) используются численные методы. Время  $\Delta t$ , необходимое для стекания жидкости на новый кольцевой участок шириной  $\Delta r$ , находится из соотношения (5), при этом от фронта жидкости оторвется  $n_a$  атомов:

$$n_a = \frac{\Delta t}{t_0 n_0} e^{u_s/kT} = \left( \frac{\alpha\mu_l r \Delta r 2\pi r}{\Delta\sigma_l \delta t_0 d_a} \right) e^{u_s/kT}, \quad (7)$$

где  $t_0$  – период колебания атомов;  $u_s$  – энергия активизации поверхностной диффузии;  $n_0 = \frac{2\pi r}{d_a}$  – число атомов на фронте жидкого металла;  $d_a$  – диаметр атомов;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура. Отсюда  $C_s = \frac{n_a}{2\pi r \Delta r}$ . В случае малых значений  $C_s$  снижение поверхностной энергии  $\Delta\sigma_a \approx \gamma_l' C_s$  ( $\gamma_l'$  – поверхностная активность жидкого металла по отношению к твердой подложке).

При анализе кинетики растекания жидких металлов по поверхности вращающейся заготовки в некоторой окружающей среде необходимо решение следующего уравнения:

$$\ddot{x}_l + \frac{\dot{x}_l}{x_l} + \frac{8\eta_l x_l}{r^2 \rho_l} - \frac{2(\sigma_{12} - \sigma_{13})}{r \rho_l x_l} = 0, \quad (8)$$

где  $x_l$  – перемещение расплава;  $\dot{x}_l, \ddot{x}_l$  – скорость и ускорение расплава;  $\rho_l, \eta_l$  – плотность и вязкость жидкости;  $\sigma_{ij}$  – удельная свободная межфазовая энергия на границе между  $i$ -й и  $j$ -й фазами.

Решение дифференциального уравнения (8) дает следующее выражение:

$$x_l^2 = \frac{4(\sigma_{12} - \sigma_{13})r}{8l} \left( t + \frac{l \frac{8\eta_l t}{r^2 \rho_l}}{\frac{8\eta_l}{r^2 \rho_l}} - 1 \right). \quad (9)$$

При одновременном движении капли жидкости, которая растекается по гладкой поверхности в некоторой окружающей среде, уравнение движения подчиняется следующему равенству:

$$m_l \ddot{x}_l = f_1 - f_2, \quad (10)$$

где  $f_1 = -\frac{du}{dx_l}$ ;  $u$  – свободная энергия системы «пластина – капля»;  $f_2$  – сила вязкого сопротивления.

Для пластины имеем следующее выражение:

$$u = \sigma_{23}S_l + \sigma_{13}a_l x_l + \sigma_{12}a(1 - x_l) + u_l, \quad (11)$$

где  $S_l$  – площадь поверхности растекающейся капли;  $u_l$  – потенциальная энергия капли в поле силы тяжести. Принимая растекающуюся каплю в виде утончающегося параллелепипеда с высотой  $Z_l = \frac{m_l}{(\rho_l a_l)}$ , имеем выражения для площади поверхности растекающейся капли и потенциальной энергии капли в поле силы тяжести:

$$\begin{aligned} S &= ax_l + 2Z_l x_l + 2Z_l a, \\ u_l &= 0,5(m_l g Z_l). \end{aligned} \quad (12)$$

Силу вязкого сопротивления можно найти из известного соотношения:

$$f_2 = \left( \frac{\alpha_l \eta_l a^2 \rho_l}{2m_l} \right) d_l^2 \frac{dx_l}{dt}. \quad (13)$$

Пренебрегая инерционными силами  $m_l \ddot{x}_l$  и подставляя полученные соотношения в уравнение (10), получаем уравнение следующего вида:

$$\left( \frac{\alpha_l \eta_l \rho_l a^2}{2m_l} \right) d_l^2 \frac{dx_l}{dt} = \Delta\sigma_l + \frac{m_l}{a\rho_l x_l^2} \left( 2\sigma_{23} + \frac{m_l g}{2a} \right), \quad (14)$$

где  $\Delta\sigma_l$  играет роль «движущей силы» растекания для тонкого слоя металла, находящегося в жидком состоянии;  $\frac{2\sigma_{23}m_l}{a\rho_l x_l^2}$  – сокращение площади переднего и заднего торцов капли в процессе ее растекания;  $\frac{m_l^2 g}{2\rho_l x_l^2 a^2}$  – понижение центра тяжести растекающегося расплава.

Интегрируя уравнение (14), получаем уравнение для кинетики одномерного растекания капли жидкого металла:

$$t = A \left( \frac{x_l^3}{3} - Bx_l + B^{\frac{3}{2}} \cdot \arctg \left( \frac{x_l}{\sqrt{B}} \right) \right), \quad (15)$$

где

$$A = \frac{d_l \eta_l \rho_l a}{2m_l \Delta\sigma_l}; \quad B = \frac{m_l \left( 2\sigma_{23} + \frac{m_l g}{2a} \right)}{a\rho_l \Delta\sigma_l}.$$

Кинетическая энергия капли жидкого металла, летящей со скоростью  $V_r$  в направлении поверхности вращающейся заготовки, можно рассчитать по следующей формуле:

$$E = 0,5\rho_l \cdot V_l \cdot V_r^2, \quad (16)$$

где  $V_r$   $\rho_l$  – объем и плотность расплава.

Если предположить, что температура расплава постоянна до окончания кристаллизации и приобретения пленкой расплава конечной формы, а также пренебрегая кривизной боковой поверхности полученной пленки на цилиндрической поверхности вращающейся заготовки, процесс утонения пленки расплава можно рассматривать с момента принятия каплей формы цилиндра с квадратным осевым сечением высотой  $h_l$  и объемом  $V_l = \frac{\pi h_l^3}{4}$ .

Сила трения на единицу поверхности слоя в радиальном направлении выражается соотношением

$$f_2 = \nu_l (\text{Re})^n \frac{\partial V_r}{\partial h_l}, \quad (17)$$

где  $\nu_l$  – кинематическая вязкость расплава;  $V_r$  – радиальная составляющая скорости;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса, определяющее границу между ламинарным и турбулентными течениями;  $\text{Re} = \rho_l \left( \frac{V_r h_l}{\eta_l} \right)$ .

При соблюдении условия диффузии жидкого металла с поверхностью вращающейся заготовки и допуская, что  $V_r \sim h_l^2$ , имеем

$$\frac{\partial V_r}{\partial h_l} = 2 \left( \frac{V_r}{h_l} \right). \quad (18)$$

При постоянстве объема растекающейся капли расплава исходя из выражения (17) можно получить выражение для радиальной составляющей скорости в следующем виде:

$$V_r = - \frac{r_l}{2h_l} \frac{dh_l}{dt}, \quad (19)$$

где  $\frac{0,5dh_l}{dt}$  – скорость перемещения центра тяжести растекающейся капли расплава;  $r_l$  – радиус пленки жидкого металла.

При увеличении радиуса образующейся пленки расплава на величину  $dh_l$  силы вязкого сопротивления совершают работу  $d\varepsilon = f_2 dr_l$  (на единицу площади). С учетом полученных соотношений скорость диссипации первоначальной кинетической энергии можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 2^{-(n+2)} \rho_l^n \nu_l^{1-n} h_l^{-3} r_l^{n+2} \left( - \frac{dh_l}{dt} \right)^{n+2}, \quad (20)$$

где  $n$  – показатель, характеризующий режим растекания. Кинетическую энергию, необходимую для перевода сферической капли в тонкую пленку на охлаждающей поверхности вращающейся заготовки, можно найти из следующего выражения:

$$E = \frac{1}{2} \rho_l V_l \left( 0,5 \frac{dh_l}{dt} \right)^2, \quad (21)$$

а работу – из формулы

$$dA' = 2\pi r dr_l \varepsilon'. \quad (22)$$

Или с учетом выражения (22) работу, совершаемую по переводу сферической капли в тонкую пленку на поверхности вращающейся заготовки, можно представить в виде

$$A = 2^{-(n+1)} \pi \rho_l^n \nu_l^{1-n} h_{l0}^{-9} \cdot \frac{r_l^{n+10}}{n+10} \left( - \frac{dh_l}{dt} \right)^{n+2}. \quad (23)$$

Выражая радиус  $r_l$  через толщину  $h_l$  и объем капли  $V_p$  или после дифференцирования по времени и перевода в более удобный вид имеем

$$\frac{d\left(\frac{dh}{dt}\right)}{\left(\frac{dh}{dt}\right)^n} = \frac{2^{-(2n-1)}}{n+10} \left(\frac{v_l}{\rho_l h_{l0}}\right)^{1-n} \cdot h_{l0}^{\frac{n+8}{2}} \cdot h_l^{\frac{n+10}{2}} dh_l. \quad (24)$$

С учетом выражения (19) формула для определения скорости полета капли имеет вид [5]

$$V_{r0}^{1-n} = \frac{(1-n) \cdot 2^{-2n+1}}{(n+8)(n+10)} \cdot \left(\frac{v_l}{\rho_l h_{l0}}\right)^{1-n} \cdot \left(h_{l0}^{\frac{n+8}{2}} \cdot \left(h_l^{\frac{n-8}{2}} - h_{l0}^{\frac{n+8}{2}}\right)\right).$$

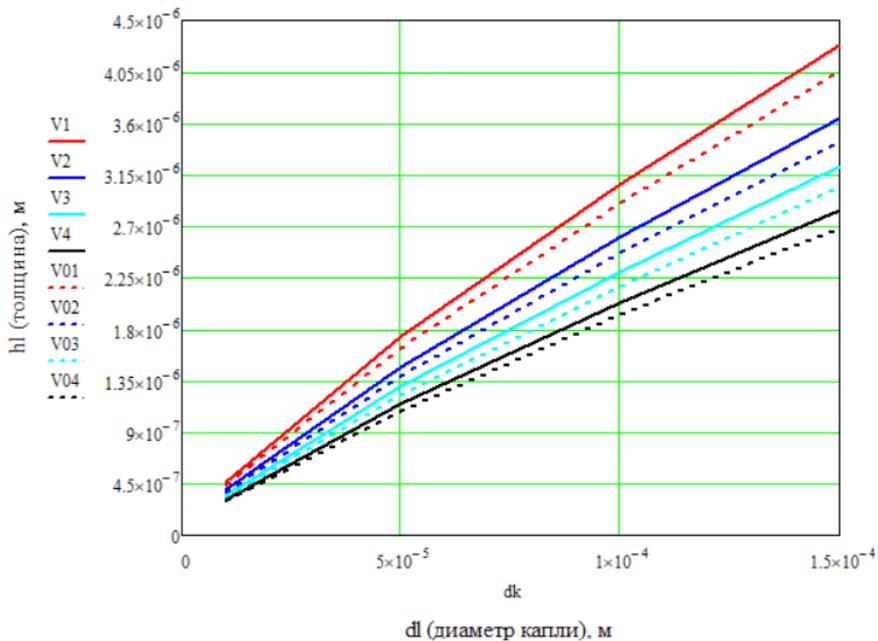
Выражение (24) можно преобразовать к более удобному виду для нахождения конечных размеров растекающейся по поверхности вращающейся заготовки капли расплава, т.е. пленки затвердевшего металла:

$$h_l = 0,406 \left(\frac{v_l}{\rho_l V_{r0}}\right)^{0,178} \cdot h_{l0}^{0,822}. \quad (25)$$

Для анализа полученной зависимости рассмотрим процесс растекания капли расплава высокопрочного сплава на основе железа  $Fe_{75,49}Cr_1Ni_{2,5}Al_6Ca_{0,06}B_{3,1}P_{0,2}Si_{7,5}Mg_{0,05}C_{1,2}Mn_{2,9}$ .

Выбираем кинематическую вязкость и плотность при температуре  $1550^\circ\text{C}$ :  $\nu_1 = 729,023 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_1 = 7250 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $h_{l0} = d_l$ .

Затем задаем скорость полета капли расплава и начальный диаметр порошка.  $V_1 = 2 \text{ м}/\text{с}$ ;  $V_2 = 5 \text{ м}/\text{с}$ ;  $V_3 = 10 \text{ м}/\text{с}$ ;  $V_4 = 20 \text{ м}/\text{с}$ ;  $d_{l1} = 10 \times 10^{-6} \text{ м}$ ;  $d_{l2} = 50 \times 10^{-6} \text{ м}$ ;  $d_{l3} = 100 \times 10^{-6} \text{ м}$ ;  $d_{l4} = 150 \times 10^{-6} \text{ м}$ .



Пояснения: линии меняются от скорости  $V_1-V_4$  капли и температуры расплава: сплошная –  $1550^\circ\text{C}$ , штриховая –  $1700^\circ\text{C}$ .

**Рисунок 2 – Результаты определения толщины пленки, полученной из капли расплава при различных начальных условиях**

**Заключение.** Анализ зависимости конечных размеров растекающейся по поверхности вращающейся заготовки капли расплава от исходных размеров капли при различных скоростях ее полета (рисунок 2) показал, что с увеличением исходных размеров капли  $d_l$  увеличивается толщина единичного элемента покрытия  $h_p$ , а с увеличением скорости полета капли  $V_0$  толщина единичного элемента покрытия  $h_p$  уменьшается. Отсюда можно сделать вывод:

для того чтобы получить наименьшие толщины единичного элемента покрытия, необходимо, чтобы исходные размеры капель, попадающих на поверхность вращающейся заготовки, имели минимальные размеры, а скорость их полета должна быть максимальной, причем с увеличением размера капли влияние скорости ее полета на толщину покрытия увеличивается.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ свойств газотермических покрытий : учеб. пособие : в 2 ч. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – Ч. 1 : Основные методы и материалы газотермического напыления / Ю. С. Коробов, В. И. Панов, Н. М. Разиков. – 80 с.
2. Анализ свойств газотермических покрытий : учеб. пособие : в 2 ч. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – Ч. 2 : Оценка параметров покрытий / Ю. С. Коробов. – 92 с.
3. Верещагин, М. Н. Исследование особенностей получения дискретных волокон при диспергировании струи расплава газовым потоком / М. Н. Верещагин, Д. Л. Стасенко // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2002. – Т. 7, № 2. – С. 77–81.
4. Закономерности растекания расплавов при их диспергировании на поверхность кристаллизатора / М. Н. Верещагин, Р. И. Вечер, Д. Л. Стасенко, М. Ю. Целуев // *Современные проблемы машиноведения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвященные Павлу Осиповичу Сухому), Гомель, 1–3 июля 1998 г. : в 2 т. / Белорус. инженер. акад., Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. С. Шагиная.* – Гомель : Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, 1998. – Т. II. – С. 47–49.
5. Стасенко, Д. Л. Получение металлического порошка и дискретных волокон с аморфной и мелкокristаллической структурой диспергированием расплава и изделий на их основе : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Дмитрий Леонидович Стасенко ; Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Минск, 2004. – 28 с.

Поступила в редакцию 16.01.2025.

“Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science”  
Vol. 15, No. 1, 2025, pp. 6–14  
© Yanka Kupala State University of Grodno, 2025

## Determination of the coating thickness formed by a single drop of melt during thermal spraying of the surface of a rotating workpiece

V. Protska<sup>1</sup>, Dz. Stasenka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Sukhoi State Technical University of Gomel (Belarus)*  
Oktiabria Ave., 48, 246029, Homel, Belarus; e-mail: vyaletaprotska@gmail.com

<sup>2</sup> *Sukhoi State Technical University of Gomel (Belarus)*  
Oktiabria Ave., 48, 246029, Homel, Belarus; e-mail: stasenko@gstu.by

**Abstract.** The introduction presents the physical foundations of gas thermal spraying and indicates the need to determine the process parameters for the resulting coatings. Analysis of film formation from a melt drop is an important task that determines the formation of the operational properties of the resulting coating. The purpose of the work is to determine the thickness of the coating film of a single drop during gas thermal spraying on the surface of a rotating workpiece. The scientific novelty of the work lies in the establishment of a relationship for finding the final dimensions of a melt droplet spreading over the surface of a rotating workpiece, i.e. a film of solidified metal. The main part shows that the process of melt droplets spreading over a solid surface is divided into three consecutive stages: at the initial stage, the droplet turns into a flat “puddle” under the influence of capillary forces and gravity, then further spreading of the liquid occurs with a power dependence of distance on time, at the last stage the spreading rate quickly decreases and the spreading stops. Conclusion of dependence is presented for determination of thickness of melt formed by single drop with consideration of its kinetic energy, friction forces at spreading and without consideration of temperature change at crystallization. The results of the study are presented in the form of graphs (figure 1). In conclusion, the results of the analysis of the dependence of the final dimensions of the melt droplet spreading over the surface of the rotating workpiece on the initial dimensions of the droplet at different flight speeds are presented. It has been found that in order to obtain the smallest thicknesses of a single coating element, it is necessary that the initial dimensions of the droplets falling on the surface of the rotating preform have minimum dimensions and their flight speed should be maximum, and with increasing droplet size, the influence of speed on the thickness of the coating increases. The field of application is the restoration and strengthening of the surfaces of machine parts during gas thermal spraying.

**Keywords:** gas thermal spraying, coating thickness, melt spreading rate, melt drop, rotating workpiece.

---

**References**

1. Analysis of the properties of gas-thermal coatings [*Analiz svoistv gazotermicheskikh pokrytii : ucheb. posobie*] : in 2 parts. Ekaterinburg. Korobov Yu. S., Panov V. I., Razikov N. M. Part 1: Basic methods and materials of thermal spraying [*Osnovnye metody i materialy gazotermicheskogo napyleniia*], 80 p.
2. Analysis of the properties of gas-thermal coatings [*Analiz svoistv gazotermicheskikh pokrytii : ucheb. posobie*] : in 2 parts. Ekaterinburg. Korobov Yu. S. Part 2: Evaluation of coating parameters [*Otsenka parametrov pokrytii*], 92 p.
3. Vereshchagin M. N., Stasenko D. L. Study of the features of obtaining discrete fibers by dispersing a melt stream with a gas flow [*Issledovanie osobennostei polucheniia diskretnykh volokon pri dispergirovanii strui rasplava gazovym potokom*]. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty*, 2002, vol. 7, No. 2, pp. 77-81.
4. Vereshchagin M. N., Vecher R. I., Stasenko D. L., Tseluev M. Yu. Regularities of melt spreading during their dispersion on the crystallizer surface [*Zakonomernosti rastekaniia rasplavov pri ikh dispergirovanii na poverkhnost' kristallizatora*]. *Modern problems of mechanical engineering : materials of Int. scientif. and tech. conf. (scientific readings dedicated to Pavel Osipovich Sukhoi)*, Homel, July 1-3, 1998 : in 2 vols. ; gen. ed.: A. S. Shaginyan. Homel, 1998, vol. 2, pp. 47-49.
5. Stasenko D. L. Production of metallic powder and discrete fibers with amorphous and fine-crystalline structure by melt dispersion and items on their basis [*Poluchenie metallicheskogo poroshka i diskretnykh volokon s amorfnoi i melkokristallicheskoii strukturoi dispergirovaniem rasplava i izdelii na ikh osnove : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk*]. Minsk, 2004, 28 p.


**Вниманию авторов!**

В научном, производственно-практическом журнале  
**«Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы.  
 Серыя 6. Тэхніка»**

предлагаются следующие рубрики:

физика конденсированного состояния (технические науки); материаловедение и технология материалов; трение и износ в машинах; технология и оборудование механической и физико-технической обработки; математическое моделирование, численные методы и комплексы программ; динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки); нанотехнологии и наноматериалы; динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры; приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий; технология и переработка полимеров и композитов; процессы и аппараты пищевых производств; машины, агрегаты и процессы; строительные материалы и изделия; история науки и техники.