В качестве исходного сырья используются металлические, керамические или полимерные порошки различной дисперсности.

Градиент пористости достигается несколькими способами: изменением мощности лазера; изменением скорости сканирования; использованием порошков разной дисперсности; варьированием толщины наносимого слоя. Этот метод особенно важен для создания фильтров, работающих при высоких температурах, давлениях и в агрессивных средах.

Фильтры, изготовленные методом SLS/SLM, обладают высокой механической прочностью, термостойкостью и длительным сроком службы, что делает их востребованными в химической промышленности, энергетике и машиностроении.

• Струйные методы (PolyJet/MultiJet) основаны на послойном нанесении жидкого материала микрокаплями с последующим отверждением. Главным преимуществом данных технологий является возможность одновременного использования нескольких материалов с различными физико-химическими свойствами. Это особенно важно при создании композиционных градиентных фильтров, где один слой должен обладать высокой механической прочностью, а другой – селективными фильтрационными свойствами.

Подобный подход позволяет получать многофункциональные фильтрующие системы с заданными зонами жесткости, пористости и химической устойчивости.

Таким образом, выбор аддитивного производства основывался на достижении определения точности размеров и форм пор при применении данного материала.

Литература

1. Деформация конденсата при формовании и активированное спекание сферических порошков при получении пористых материалов / П. А. Витязь, В. Н. Ковалевский, А. В. Ковалевская [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – № 2. – С. 139–145.
2. Горовцова, В. В. Исследование возможности получения градиентных фильтров / В. В. Горовцова // МИТРо 2025 – Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника : материалы докл. науч.-техн. конф., Гомель, 5 дек. 2025 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2025. – С. 63–65.

ТЕПЛОПОТЕРИ КАПЕЛЬНОЙ ФАЗЫ РАСПЛАВА В ПОЛЕТЕ К МИШЕНИ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

Т. Д. Стасенко, В. Ю. Процко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Приведен качественный анализ влияния теплопотерь капельной фазы расплава в полете к мишени при газотермическом напылении. Установлено, что скорость охлаждения капель расплава зависит от многих факторов – их геометрических размеров, коэффициента теплоотвода конвекцией, температуры расплава, физико-химических свойств. Уменьшение размера капель расплава ведет к росту скорости охлаждения с одновременным уменьшением времени охлаждения и затвердевания частиц [1].

Ключевые слова: расплав, теплоотвод, конвекция, излучение, температура, тепловая энергия.

За время полета капли через газ одновременно происходит перенос количества движения и теплоты. Поэтому для расчета кинетики выделяемой теплоты и пробега капли необходимо решить серию дифференциальных уравнений теплопереноса и изме-

нения скорости для сферической частицы. При движении капля охлаждается. Продолжительность охлаждения капель расплава до начала процесса кристаллизации определяется как время, требуемое для выделения частицей теплоты перегрева $Q_{\text{пер}}$.

Потери частицей тепловой энергии за бесконечно малое время Δt_i составляют:

$$Q_{Ti} = \pi d_c^2 \left[a_i \left(T_i - T_{\text{г}} \right) + \varepsilon C_0 \left(T_i^4 - T_{\text{ст}}^4 \right) \right] \Delta t_i, \tag{1}$$

где a_i – коэффициент теплоотдачи; T_i – температура частицы в момент времени Δt_i; $T_{\text{г}}$ – температура газа; ε – степень черноты; C_0 – универсальная постоянная Стефана-Больцмана; $T_{\text{ст}}$ – температура стенки камеры.

Из условия теплового баланса на стадии отвода тепла перегрева:

$$Q_T - \sum_{i=1}^{n} Q_{Ti} = 0 \tag{2}$$

можно определить время охлаждения частиц до начала кристаллизации:

$$\tau_{\text{охл}} = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i. \tag{3}$$

При расчетах Δt_i необходимо учитывать то обстоятельство, что значение коэффициента теплоотдачи a_i в уравнении (1) изменяются во времени. Мгновенное значение a_i в процессе движения частиц можно рассчитать по известной формуле [2]:

$$a_i = \frac{Nu_i \lambda_{\text{г}}}{d_c}, \tag{4}$$

где $\lambda_{\text{г}}$ – коэффициент теплопроводности среды; $Nu = 2 + 0{,}6\,\text{Pr}^{1/3}\, Re^{0{,}5}$ – число Нуссельта; $Pr = (\mu_{\text{г}} Cp_{\text{г}}) / \lambda_{\text{г}}$ – число Прандтля; $Cp_{\text{г}}$ – удельная теплоемкость среды; Re – число Рейнольдса. При определении числа Re_i авторами [3] используется зависимость:

$$Re_i = \frac{\pi d_c \rho_2 \left[\left(V_{\text{г}xi} + V_{\text{г}i} \right)^2 + V_{\text{г}yi}^2 \right]^{0{,}5}}{2\mu_{\text{г}}}, \tag{5}$$

где $V_{\text{г}x}$, $V_{\text{г}y}$ – горизонтальная и вертикальная координаты частицы; $V_{\text{г}}$ – скорость встречного потока газа; $\rho_{\text{г}}$ – плотность среды. При значениях $V_{\text{г}i} \neq 0$ выражение (5) позволяет оценивать условия движения и теплообмена частиц при противотоке газа.

Время полной кристаллизации определяется как сумма времени, необходимого для выделения частицей теплоты перегрева и времени кристаллизации расплава:

$$\tau_{\text{кр}} = \tau_{\text{охл}} + \sum_{i=1}^{k} \Delta t_{i\text{кр}}. \tag{6}.$$

Скорость охлаждения частицы в жидком или твердом состоянии находится из условия равенства изменения энтальпии $d(\Delta H)$ и теплоты, которая отводится от сферической частицы конвекцией и излучением $dQ_т$. Последняя находится дифференцированием уравнения (1) по времени.

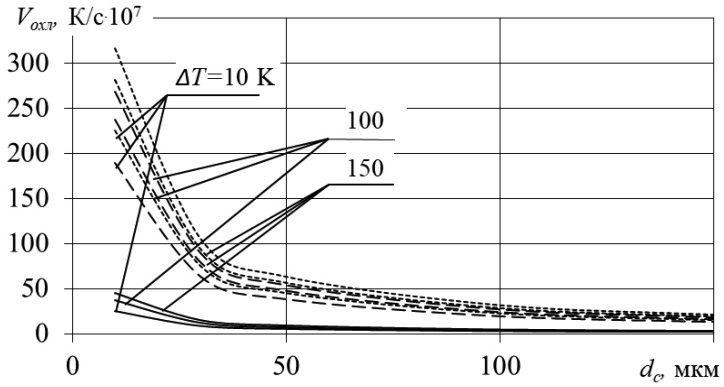


Рис. 1. Зависимость скорости охлаждения частицы в зависимости от ее диаметра при различных значениях температуры нагрева расплава ΔT:
—— – бронза (Бр.ОФ10-1); – - – сталь У8; · · · – нержавеющая сталь (12Х18Н10)

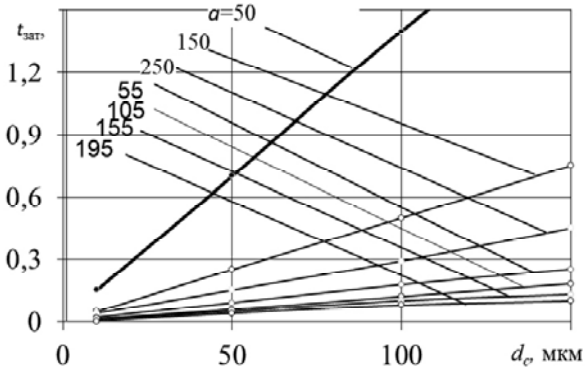


Рис. 2. Изменение времени затвердевания частицы стали У8 в зависимости от ее диаметра при различных значениях коэффициента теплоотвода конвекцией

Изменение энтальпии определяется из выражения

$$d(\Delta H) = Cp_г m_ч dT_i, \tag{7}$$

где $Cp_г$ – удельная теплоемкость газа; $m_ч$ – масса частицы; dT_i – изменение температуры частицы.

Условие $d(\Delta H) = dQ_т$ выполняется при условии $Hi < 0{,}1$, где Hi – критерий Хинзе–Мильборна.

Это позволяет определить скорость охлаждения частицы [4]:

$$V_{охл} = \frac{d\dot{T}_i}{dt} = \frac{6a(T_i - T_г) + 6\varepsilon C_0\left(T_i^4 - T_{СТ}^4\right)}{Cp_г \rho_l d_c}. \tag{8}$$

Из полученного выражения (8) видно, что скорость охлаждения капель расплава зависит от многих факторов, таких как геометрические размеры капель расплава, коэффициента теплоотвода конвекцией, температуры расплава, свойств распыляемого материала и других, что иллюстрируется графическими зависимостями, представленными на рис. 1, 2. Из рис. 1 видно, что потери теплочастицы наиболее интенсивно происходит при их диаметре менее 50 мкм, а при больших диаметрах изменение скорости охлаждения имеет линейно-затухающий характер. Из рис. 2 видно, что изменение температуры капель расплава зависит от их размеров и имеет линейно-возрастающий характер.

Установлено, что скорость охлаждения капель расплава зависит от многих факторов: их геометрических размеров, коэффициента теплоотвода конвекцией, температуры расплава, физико-химических свойств. Уменьшение размера капель расплава после диспергирования ведет к росту скорости охлаждения с одновременным уменьшением времени охлаждения и затвердевания получаемых частиц.

Литература

1. Стасенко, Д. Л. Особенности центробежного диспергирования капельной фазы расплава / Д. Л. Стасенко // Материалы, технологии, инструменты. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 55–58.
2. Стасенко, Д. Л. Анализ влияния теплоотвода при вторичном диспергировании капельной фазы расплава на структуру и микротвердость получаемых металлических порошков / Д. Л. Стасенко, И. Н. Степанкин // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 86–90.
3. Жаров, М. В. Исследование закономерностей процесса охлаждения и кристаллизации капель расплава алюминиевых сплавов в водной среде / М. В. Жаров // Прикладная механика и техническая физика. – 2023. – Т. 64, № 6. – С. 4–16.
4. Зверева, Е. Н. Оценка переменной интенсивности отвода теплоты от поверхности падающих и кристаллизующихся капель расплавов в процессе их приллирования / Е. Н. Зверева, Ю. А. Таран // Теоретические основы химической технологии – 2017 – Т 12, № 1. – С. 45–49.

ФОТОПОЛИМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Е. А. Гавриленко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научные руководители: И. Н. Прусенко, И. Б. Одарченко

Представлены исследования влияния химического состава фотополимерных смол, геометрии образцов и температурного режима прокалки на зольность моделей, полученных методом 3D-печати, для литья по выплавляемым моделям. Показано, что снижение отношения площади поверхности к объему образцов и их ускоренный нагрев увеличивают коксовый остаток за счет диффузионных ограничений и неполного дожигания углеродистых фракций. Установлено, что оптимизация температурного профиля прокалки обеспечивает снижение зольности и повышения точности литейных процессов.

Ключевые слова: 3D-печать, VAT-полимеризация, SLA, MSLA, фотополимеры, литье по выплавляемым моделям, зольность.

Современные возможности фотополимерной 3D-печати (VAT-полимеризация) все больше применяются в литейном производстве и являются перспективным инструментом повышения точности и эффективности литейных процессов. Основной