

ОХЛАЖДЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА

COOLING OF POLYMERIC MATERIALS IN ADDITIVE TECHNOLOGIES UNDER CONDITIONS OF STATIONARY HEAT EXCHANGE

УДК 678.5:004.356

В.В. Дрюков*, А.А. Котов, С.М. Кузьменков,
Витебский государственный технологический университет

<https://doi.org/10.24411/2079-7958-2019-13704>

V. Dryukov*, A. Kotov, S. Kuzmenkov,
Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

ОХЛАЖДЕНИЕ, ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, КОНСТРУКЦИЯ 3D-ПРИНТЕРОВ

Объектом исследований является охлаждение полимерных материалов в аддитивных технологиях.

Целью работы является изучение охлаждения полимерных материалов при обдуве зоны затвердевания в 3d-принтере потоком воздуха через сопло охлаждения.

В результате выполненных расчетов по предложенной методике показано, что применение обдува зоны затвердевания полимерных материалов потоком воздуха через сопло охлаждения позволяет при скорости потока $w = 8,5$ м/с сократить время охлаждения материала практически в 2 раза, что, в свою очередь, дает возможность увеличить производительность печати. Кроме того, охлаждение строго направленным потоком воздуха через сопло устраняет необходимость тепловой защиты печатающей головки 3d-принтера, возникающей при применении вентиляторов обдува.

ABSTRACT

COOLING, POLYMERIC MATERIALS, ADDITIVE TECHNOLOGIES, STATIONARY HEAT EXCHANGE

The research object is the cooling of polymeric materials in additive technologies.

The purpose of the work is the study of the cooling of polymeric materials while blowing a solidification zone in 3d-printer with air flow through a cooling nozzle.

As a result of the calculations performed according to the proposed methodology, it was demonstrated that blowing the zone of solidification of polymeric materials by air flow through the cooling nozzle allows for a flow rate of $w = 8.5$ m/s to reduce the cooling time of the material by almost 2 times, which, in turn, enables to increase printing performance. In addition, cooling with a strictly directed air flow through the nozzle eliminates the need for thermal protection of the print head of a 3d-printer that occurs when blowing fans are used.

В настоящее время в Республике Беларусь на ряде предприятий ведется разработка конструкций 3d-принтеров, пригодных для серийного производства. При этом одной из важнейших проблем является реализация охлаждения материала в процессе печати. Охлаждение нанесенного слоя до температуры несколько ниже температуры размягчения [1] необходимо для получения высокой адгезии между слоями нано-

симого полимерного материала и предотвращения растекания наплавленного слоя.

Целью работы является исследование охлаждения полимерных материалов в аддитивных технологиях при обдуве зоны затвердевания потоком воздуха через сопло охлаждения.

Охлаждение полимерных материалов при 3d-печати является, строго говоря, нестационарным процессом. Но в процессе нанесения ма-

* E-mail: tiomp.vstu@mail.ru (V. Dryukov)

териала и скорость перемещения печатающей головки 3d-принтера, и скорость подачи филамента, и количество затрачиваемого для его расплавления тепла во времени практически не изменяются. Неизменной при этом является также и скорость потока охлаждающего воздуха. Таким образом, мощность отводимого теплового потока будет постоянной, что позволяет в первом приближении рассматривать при создании математической модели, описывающей охлаждение нанесенного материала, этот процесс как стационарный. Однако следует иметь в виду, что выводы, полученные в результате применения такой модели, носят оценочный характер.

В большинстве конструкций современных 3d-принтеров предусматривается установка одного или нескольких вентиляторов, которые обеспечивают охлаждение распечатываемой модели. Однако такой метод имеет существенные недостатки. Во-первых, это относительно низкая эффективность охлаждения, а во-вторых, возникает необходимость тепловой защиты самой печатающей головки 3d-принтера. Охлаждение печатающей головки является недопустимым, поскольку это может привести к застыванию в ней полимерного материала при определенных режимах печати, что вызовет закупорку сопла экструдера и остановку процесса печати.

Для интенсификации процесса охлаждения и обеспечения требуемой прочности соединения наплавляемого материала с нижележащим слоем предлагается использовать обдув зоны наплавки потоком воздуха через специальное сопло охлаждения, направленное вдоль наплавляемого слоя под углом порядка 20° к горизонтали (рисунок 1).

Количество выделяющейся в процессе охлаждения нанесенного слоя тепловой энергии может быть определено по уравнению

$$Q = \rho \cdot V_{нл.} \cdot c \cdot \Delta t, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где ρ – плотность наплавляемого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; $V_{нл.}$ – объем выдаваемого материала, $\text{м}^3/\text{с}$; c – теплоемкость материала, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{град}$; Δt – изменение температуры в зоне наплавки, $^{\circ}\text{C}$.

Параметры процесса нанесения полимерного материала при 3d-печати могут изменяться в достаточно широких пределах, однако наиболее часто применяются: диаметр печатающего сопла $d = 0,4 \text{ мм}$; высота наносимого слоя $\delta = 0,1 \div 0,2 \text{ мм}$; толщина стенки $s = 0,8 \div 1,6 \text{ мм}$; скорость печати $w_{неч.} = 60 \text{ мм}/\text{с}$. Объем выдаваемого ма-

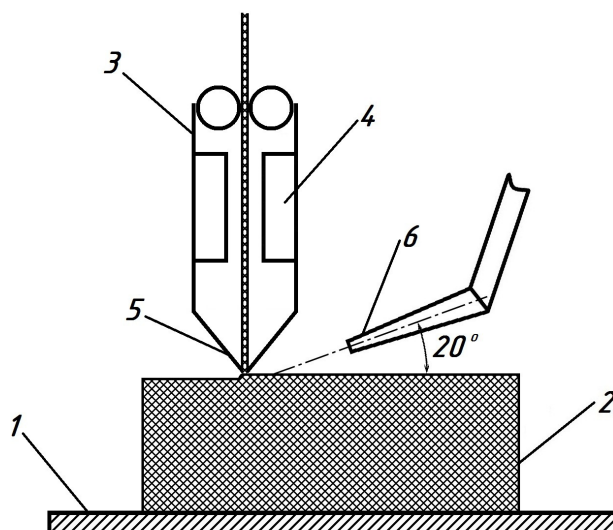


Рисунок 1 – Схема охлаждения потоком воздуха через сопло:

1 – стол; 2 – формируемое изделие; 3 – экструдер; 4 – нагревательный блок; 5 – сопло экструдера; 6 – сопло системы охлаждения

териала при этом составляет в среднем $V_{пл.} = 5 \text{ мм}^3/\text{с} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$.

При определении мощности теплового потока Q_o , отдаваемого с поверхности наплавляемого материала, необходимо учитывать как конвективный, так и лучистый теплообмен:

$$Q_o = Q_{\lambda} + Q_{\kappa} . \quad (2)$$

Мощность теплового потока, отдаваемого излучением Q_{λ} , рассчитывается в соответствии с законом Стефана-Больцмана [2]:

$$Q_{\lambda} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \cdot \left(\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right) , \quad (3)$$

где ε – степень черноты поверхности тела; $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; F – площадь зоны охлаждения; T_{cm} и $T_{жс}$ – средние абсолютные температуры поверхности тела и окружающей среды соответственно.

При расчете мощности конвективного теплового потока Q_{κ} применяется уравнение Ньютона-Рихмана:

$$Q_{\kappa} = \alpha_{\kappa} \cdot F \cdot (t_{cm} - t_{жс}) , \quad (4)$$

где α_{κ} – коэффициент теплоотдачи конвекцией. Для нахождения значения коэффициента теплоотдачи конвекцией необходимо использовать критериальные уравнения.

При свободной конвекции критериальное уравнение в общем случае имеет вид:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n . \quad (5)$$

В этом уравнении: Nu – число Нуссельта,

$$Nu = \frac{\alpha_{\kappa} \cdot l}{\lambda_{жс}} ; \quad (6)$$

Gr – критерий Грасгофа,

$$Gr = \frac{l^3}{\nu_{жс}} \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta t ; \quad (7)$$

Pr – критерий Прандтля.

Здесь l – определяющий размер тела, $\lambda_{жс}$ – коэффициент теплопроводности окружающей среды, $\nu_{жс}$ – коэффициент кинематической вязкости окружающей среды, β – коэффициент объемного температурного расширения окружающей среды, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, Δt – температурный напор между поверхностью тела и окружающей средой. Значения физических параметров среды ($\lambda_{жс}$, $\nu_{жс}$, Pr) определяются по таблице параметров воздуха [2] в зависимости от определяющей температуры, значение коэффициента объемного температурного расширения для газообразных веществ

$$\beta = \frac{1}{T_{жс}} . \quad (8)$$

В нашем случае определяющим размером будет являться ширина зоны охлаждения, равная толщине стенки ($l = s$), а определяющей температурой является средняя температура пограничного слоя:

$$t_{n.c.} = \frac{t_{cm} + t_{жс}}{2} , \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (9)$$

В случае свободной конвекции с горизонтальной поверхностью при верхнем ее расположении при $(Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7$ критериальное уравнение принимает вид [3]

$$Nu = 0,702 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} . \quad (10)$$

При вынужденной конвекции критериальное уравнение при движении среды вдоль под углом 20° к поверхности [2] для случая ламинарного движения, что имеет место при $Re = 5 \div 1 \cdot 10^3$, принимает вид

$$Nu = 0,3 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,38}, \quad (11)$$

а для случая турбулентного движения, что имеет место при $Re = 1 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5$, вид

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38}. \quad (12)$$

В этом уравнении Re – критерий Рейнольдса,

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu_{ж}}, \quad (13)$$

где w – скорость потока.

В этом случае определяющим размером будет являться ширина зоны охлаждения ($l = s$), а определяющей температурой – средняя температура окружающей среды $t_{ж}$.

Значения физических параметров (температура плавления $t_{пл.}$, температура экструзии $t_{экт.}$, температура размягчения $t_{разм.}$, плотность ρ , массовая теплоемкость c), наиболее часто используемых для 3d-печати полимерных материалов, приведены в таблице 1.

Проведем расчет требуемой скорости охлаждающего воздушного потока для 3d-печати при использовании различных материалов.

Количество выделившегося тепла определяется согласно формуле (1), при этом изменение

температуры в зоне наплавки

$$\Delta t = t_{экт.} - t_{разм.}. \quad (14)$$

Время охлаждения зоны печати, как было установлено в результате проведенных экспериментов, должно составлять порядка $\tau_{охл.} = 0,8$ с.

Количество отводимого при охлаждении тепла получим равным

$$Q_o = \frac{Q}{\tau_{охл.}}, \quad \text{Вт}. \quad (15)$$

Средняя температура поверхности материала по всей зоне охлаждения тогда будет равна

$$t_{см} = \frac{t_{экт.} + t_{разм.}}{2}, \quad ^\circ\text{C}. \quad (16)$$

Принимая значение степени черноты для полимерных материалов $\varepsilon = 0,7$, мощность теплового потока, отдаваемого излучением, определяем в соответствии с законом Стефана-Больцмана (3). При этом, как правило, температура окружающей среды $t_{ж}$ принимается равной 20°C . Площадь зоны охлаждения $F = 57,6 \text{ мм}^2 = 5,76 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Тогда, в соответствии с формулой (2), за счет конвективного теплообмена необходимо отве-

Таблица 1 – Физические свойства материалов для 3d-печати

Материал	$t_{пл.}, ^\circ\text{C}$	$t_{экт.}, ^\circ\text{C}$	$t_{разм.}, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/кг} \cdot \text{град}$
ABS-пластик	210	270	105	1040	1350
PLA-пластик	180	230	50	1250	1270
PETG-пластик	220	240	80	1270	1030
HIPS-пластик	210	240	97	1050	1190
BFNylon-пластик	220	260	120	1130	1310
PC-пластик	300	310	135	1200	1100
PC/ABS-пластик	240	260	127	1110	1150
ASA-пластик	220	270	100	1080	1330

$$Q_k = Q_o - Q_l, \text{ Вт.} \quad (17)$$

Исходя из уравнения Ньютона-Рихмана (4), коэффициент теплоотдачи конвекцией при этом должен составлять

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{F_{np} \cdot (t_{cm} - t_{ж})}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.} \quad (18)$$

Рассчитав значение числа Нуссельта по формуле (6), из критериального уравнения (11) или (12) находим величину критерия Рейнольдса. Из формулы (13), необходимая скорость потока охлаждающего воздуха равна

$$w = \frac{Re \cdot \nu_{ж}}{l}, \text{ м/с.} \quad (19)$$

Полученные результаты приведены в таблице 2.

Таким образом видно, что при данных условиях необходимая скорость охлаждающего потока воздуха в зависимости от вида используемого для печати пластика изменяется в пределах от 3,67 м/с до 22,08 м/с и в среднем составляет около 8,5 м/с.

По формулам (2)–(4), (6)–(9), с использованием уравнений (10) и (11), проведем тепловой расчет процессов 3d-печати полимерных мате-

риалов при тех же условиях, без обдува поверхности материала и в случае применения обдува потоком воздуха со скоростью $w = 8,5 \text{ м/с}$. Время охлаждения наплавленного материала $\tau_{охл.}$ при этом определяется как

$$\tau_{охл.} = \frac{Q}{Q_o}, \quad (20)$$

длина зоны охлаждения $l_{охл.}$, на протяжении которой происходит затвердевание пластика – как

$$l_{охл.} = \frac{W_{печ.}}{\tau_{охл.}}. \quad (21)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 3.

ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты показывают, что применение обдува зоны затвердевания полимерных материалов потоком воздуха через сопло охлаждения позволяет при скорости потока $w = 8,5 \text{ м/с}$ сократить время охлаждения материала практически в 2 раза, что, в свою очередь, дает возможность увеличить производительность печати.

2. Охлаждение строго направленным потоком воздуха через сопло устраняет необходимость тепловой защиты печатающей головки 3d-принтера, возникающей при применении вентиляторов обдува.

Таблица 2 – Параметры процессов теплоотдачи при 3d-печати

Материал	Q, Дж	t _{см} , °C	Q _о , Вт	Q _л , Вт	Q _к , Вт	α_k , Вт/м ² ·град	Re	w, м/с
ABS-пластик	1,158	187,5	1,448	0,086	1,362	141,2	620	7,78
PLA-пластик	1,429	140	1,787	0,051	1,736	251,2	1759	22,08
PETG-пластик	1,046	160	1,308	0,064	1,244	154,3	741	9,29
HIPS-пластик	0,893	168,5	1,116	0,069	1,047	122,4	466	5,85
BFNylon-пластик	1,036	190	1,295	0,088	1,207	123,3	475	5,96
PC-пластик	1,155	222,5	1,444	0,122	1,322	113,3	399	5,01
PC/ABS-пластик	0,849	193,5	1,061	0,092	0,969	97,0	293	3,67
ASA-пластик	1,221	185	1,526	0,084	1,442	151,7	716	8,98

Таблица 3 – Результаты интенсификации охлаждения зоны 3d-печати

Материал	$Q_o, Вт$		$\tau_{охл.}, с$		$l_{охл.}, мм$	
	без обдува	с обдувом	без обдува	с обдувом	без обдува	с обдувом
ABS-пластик	0,784	1,478	1,47	0,78	88,5	47,0
PLA-пластик	0,699	1,382	2,04	1,03	122,6	62,0
PETG-пластик	0,661	1,280	1,58	0,82	94,8	49,0
HIPS-пластик	0,636	1,218	1,40	0,73	84,2	43,9
BFNylon-пластик	0,750	1,409	1,38	0,74	82,9	44,1
PC-пластик	0,890	1,631	1,30	0,71	77,9	42,5
PC/ABS-пластик	0,688	1,289	1,23	0,66	74,1	39,5
ASA-пластик	0,692	1,505	1,76	0,81	105,8	48,6

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Повышение качества 3d-печати с помощью охлаждения, 2016, [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://habr.com/ru/post/179533/>. – Дата доступа 12.10.2019.
2. Нащокин, В. В. (2009), *Техническая термодинамика и теплопередача*, Москва, 469 с.
3. Исаченко, В. П., Осипова, В. А., Сукомел, А. С. (2014), *Теплопередача*, Москва, 416 с.
4. Как правильно печатать филаментом PLA, 2017, [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://rusabs.ru/blogs/blog/PLA-Filament-Printing>. – Дата доступа 03.10.2019.

REFERENCES

1. Improving 3D printing quality with cooling [Povyshenie kachestva 3d pechati s pomoshchu ohlazhdeniya], (2016), available at <https://habr.com/ru/post/179533> – (accessed 12.10.2019).
2. Nashchokin, V. V. (2009), *Technical thermodynamics and heat transfer* [Tehnicheskaja termodinamika i teploperedacha], Moscow, 469 p.
3. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., Sukomel, A. S. (2014), *Teploperedacha* [Heat transfer], Moscow, 416 p.
4. How to print with filament PLA [Kak pravilno pechatat filamentom PLA], (2017), available at <https://rusabs.ru/blogs/blog/PLA-Filament-Printing> – (accessed 12.10.2019).

Статья поступила в редакцию 18. 10. 2019 г.