

Моделирование температурных полей при аддитивном производстве металлических изделий

Д.Д. Какорин¹, Б.И. Марголис¹✉

¹ Тверской государственной технический университет, г. Тверь, 170026, Россия

Ссылка для цитирования

Какорин Д.Д., Марголис Б.И. Моделирование температурных полей при аддитивном производстве металлических изделий // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38. № 1. С. 143–149. doi: 10.15827/0236-235X.149.143-149

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.3

Поступила в редакцию: 08.04.2024

После доработки: 25.04.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

Аннотация. В статье обоснована необходимость исследования характера распределения температуры при аддитивном производстве металлических изделий. Рассмотрены особенности моделирования температурного поля, возникающего в процессе послойной электродуговой наплавки металлических деталей плоской геометрической формы с учетом несимметричного конвективно-радиационного теплообмена поверхности с окружающей средой. Подробно описана методика расчета температурного поля в двухмерных пространственных координатах на основе численных конечно-разностных методов. При этом учтены возможности сдвига начальной точки наплавленного слоя от края основания, изменения времени выдержки между наплавленными слоями и применения принудительного воздушного охлаждения металла. Рассмотрен механизм определения температуры в граничных точках конструкции, непосредственно контактирующих с расплавленным металлом. Разработана программа в среде MATLAB, позволяющая на основе заданных теплофизических характеристик наплавленного металла, параметров конвективно-радиационного теплообмена и геометрических характеристик наплавленной конструкции моделировать температурное поле в изделии. Приведены тексты функций TempSurfacing для моделирования температурного поля и TempDepend для учета зависимости теплофизических свойств металла от его температуры перед наплавкой нового слоя. Проверена работоспособность программы на примере наплавки одного слоя металла высотой 2 мм на металлическое основание высотой 5 мм. Показан внешний вид окна программы для ввода исходных данных, и приведены результаты моделирования температурного поля в двухмерных пространственных координатах в текстовом, а также графическом видах. Полученная модель температурного поля позволяет учесть прибавление новых частей металла по длине наплаваемого слоя, а также поэтапное увеличение высоты конструкции за счет послойного наплавления металла. Разработанная модель предназначена для установления оптимального термического цикла процесса послойного электродугowego наплавления и идентификации условий теплообмена с учетом изменения рабочих параметров технологического процесса аддитивного производства.

Ключевые слова: моделирование, температурное поле, аддитивное производство, конвективно-радиационный теплообмен, конечно-разностные методы, программа, MATLAB, электродуговая наплавка

Введение. В промышленном производстве металлических изделий широкое применение находят аддитивные технологии. Высокий потенциал для реализации имеет технология послойного электродугowego наплавления проволочного материала, отличающаяся высокой производительностью, простотой и доступностью используемого оборудования [1]. Однако успешное промышленное внедрение и использование данной технологии невозможно без программ, позволяющих выполнять математическое моделирование температурных полей, возникающих в процессе послойной электродуговой наплавки металла.

В настоящее время известно множество способов моделирования тепловых процессов, возникающих в процессе сварки и наплавки. Подходы, используемые для моделирования тепловых процессов при сварке деталей, широко применяются для прогнозирования каче-

ства изготавливаемой продукции. Например, моделирование на основе программы ANSYS Workbench позволяет строить точные модели распределения тепловых полей в зоне сварки для прогнозирования качества сварных соединений и оптимизации управления сварочным процессом [2]. Математическое моделирование используется также для создания численных моделей процесса капельного переноса электродного металла на основе в процессе сварки, позволяющих изучить влияние силы сварочного тока, сил поверхностного натяжения и силы тяжести на формирование капли расплавленного металла [3]. Существенным недостатком перечисленных методов является отсутствие возможности их использования для моделирования температурных полей в процессе аддитивного производства металлических изделий. В первую очередь это связано с особенностями послойного добавления новых

частей металла и с постоянным увеличением высоты наплавляемой конструкции.

Известны методы моделирования, позволяющие описывать процесс течения расплавленного металла и его тепловое состояние при аддитивном производстве путем селективного лазерного плавления присадочного металла [4, 5]. Однако из-за различий между механизмами передачи и распределения температуры у лазерных и электродуговых источников энергии и типами присадочных материалов данные методы не могут быть использованы для корректного описания процессов аддитивного производства на основе послойной электродуговой наплавки, а известные общие методики моделирования тепловых процессов не учитывают все особенности технологического процесса электродуговой наплавки [6, 7]. Таким образом, актуальной задачей является разработка метода моделирования температурных полей, возникающих в процессе аддитивного производства, с учетом использования электродугового источника энергии и проволочного присадочного материала.

Постановка задачи моделирования температурного поля при аддитивном производстве металлических изделий

Для решения задачи предложен подход к моделированию температурных полей в металлических изделиях геометрической формы типа стенки (рис. 1).

Для корректного описания распределения температуры при аддитивном производстве

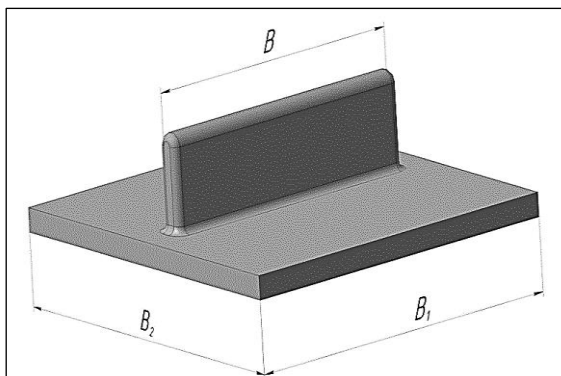


Рис. 1. Металлическое изделие геометрической формы типа стенки:
 B – длина наплавляемого слоя; B_1 и B_2 – длина и ширина основания изделия

Fig. 1. Geometric metal product of the wall type:
 B – welded layer length;
 B_1 and B_2 – product base length and width

металлических изделий необходимо учесть передачу тепла наплавляемой конструкции в процессе электродугового расплавления и переноса проволочного присадочного металла на поверхность основания. При этом по мере наплавления металла происходит перемещение источника тепловой энергии по длине слоя. Изменение температуры наплавленной конструкции осуществляется за счет теплопроводности, а также воздушного и радиационного теплообмена внешних поверхностей с окружающим воздухом и телами.

Для расчета температурного поля $T(x, z, \tau)$ и упрощения задачи рассматривается вертикальное сечение конструкции и решается дифференциальное уравнение теплопроводности в двухмерных пространственных координатах:

$$\frac{\partial T(x, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 T(x, z, \tau)}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T(x, z, \tau)}{\partial x^2} \right], \quad (1)$$

где x – координата по длине наплавляемого слоя B ; z – координата по высоте наплавляемого изделия L ; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Большое значение для точного моделирования температурного поля в наплавляемом изделии играет возможность учета постоянного изменения геометрии конструкции, зависимости теплофизических свойств стали от температуры, сложных граничных условий для температур наплавляемых и соседних точек [8, 9]. В связи с этим для решения задачи теплопроводности удобно использовать явную схему конечно-разностного метода [10, 11], заключающуюся в замене непрерывной функции температуры T совокупностью ее значений, определенных на установленном множестве точек заданной области (рис. 2).

Разработка модели температурного поля при аддитивном производстве металлических изделий

Для решения задачи методом конечных разностей частные производные в дифференциальном уравнении теплопроводности (1) по времени 1-го порядка, по длине и высоте 2-го порядка для внутренних точек конструкции необходимо заменить на их численные аналоги:

$$\frac{T_{i+1}(j, r) - T_i(j, r)}{\Delta \tau},$$

$$\frac{T_i(j, r-1) - 2T_i(j, r) + T_i(j, r+1)}{(\Delta L)^2},$$

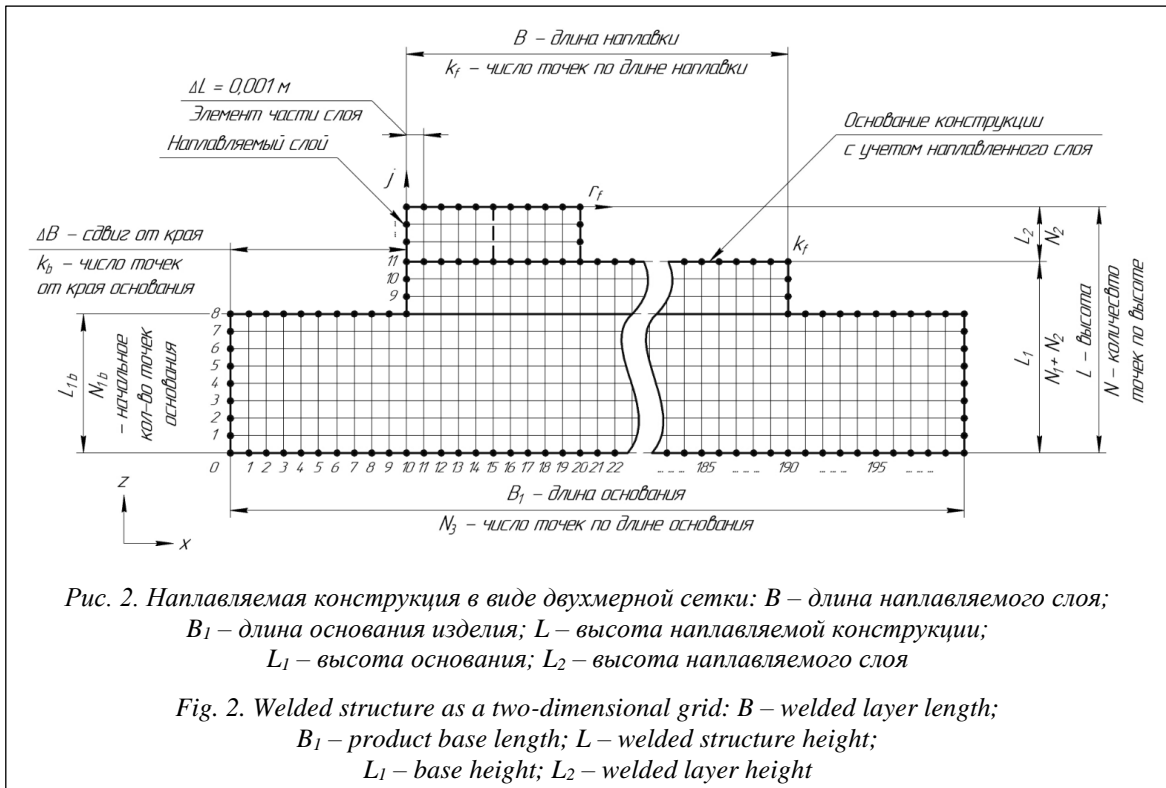


Рис. 2. Наплавляемая конструкция в виде двумерной сетки: B – длина наплавляемого слоя; B_1 – длина основания изделия; L – высота наплавляемой конструкции; L_1 – высота основания; L_2 – высота наплавляемого слоя

Fig. 2. Welded structure as a two-dimensional grid: B – welded layer length; B_1 – product base length; L – welded structure height; L_1 – base height; L_2 – welded layer height

$$\frac{T_i(j-1, r) - 2T_i(j, r) + T_i(j+1, r)}{(\Delta L)^2},$$

где $i = \overline{0, i_f}$ – переменная расчета по времени; $j = \overline{0, N}$ – переменная по высоте и $r = \overline{0, N_3}$ по длине конструкции; Δt и ΔL – шаги расчета по времени и длине слоя соответственно.

Для упрощения расчетных формул и увеличения скорости вычислительных операций выделены коэффициенты, содержащие постоянные значения теплофизических характеристик:

$$GT = \frac{\Delta t \alpha}{\Delta L^2}, \quad GT_2 = 2GT, \quad GC = GT_2 \left(\frac{\alpha \Delta L}{\lambda} \right),$$

$$GC_2 = GT_2 \left(\frac{\alpha_b \Delta L}{\lambda} \right), \quad GR_1 = GT_2 \left(\frac{\varepsilon_1 \sigma \Delta L}{\lambda} \right),$$

$$GR_2 = GT_2 \left(\frac{\varepsilon_2 \sigma \Delta L}{\lambda} \right),$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α и α_b – коэффициенты конвективного теплообмена при естественном и вынужденном охлаждении, Вт/(м²·К); $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴); ε_1 и ε_2 – степени черноты для нижней и верхней поверхностей наплавляемой конструкции.

С учетом сдвига начальной точки наплавляемого слоя от границы основания на расстояние ΔB представим формулы расчета температуры

– для внутренних точек по высоте конструкции:

$$T_{i+1}(j, r) = T_i(j, r) + GT(T_i(j-1, r) - 2T_i(j, r) + T_i(j+1, r)), \quad (2)$$

где $r = \overline{k_b, r_f + k_b - 1}$ и $j = \overline{1, N - 1}$;

– для нижней поверхности основания:

$$T_{i+1}(0, r) = T_i(0, r) + GT_2(T_i(1, r) - T_i(0, r)) + GC(T_c - T_i(0, r)) + CR_1(T_k - (T_i(0, r) + K)^4); \quad (3)$$

– для верхней границы наплавленного слоя:

$$T_{i+1}(N, r) = T_i(N, r) + GT_2(T_i(N-1, r) - T_i(N, r)) + GC(T_c - T_i(N, r)) + GR_2(T_k - (T_i(N, r) + K)^4), \quad (4)$$

где $T_k = (T_c + K)^4$, T_c – температура окружающей среды, °С, $K = 273,15$ град.

Затем находим температурное распределение в оставшихся частях металлического основания $r < k_b$ и $r > k_f$, где $k_f = r_f + k_b - 1$. Для внутренних точек по высоте конструкции используется формула (2) при $j = \overline{1, N_{1b} - 1}$, где N_{1b} – начальное количество точек основания. Температура во внешних точках основания определяется по формулам (3) и (4) для $N = N_{1b}$.

Определение изменения температуры по длине металлического основания при $j = \overline{0, N_{1b}}$ для внутренних точек при $r = \overline{1, k_f - 1}$ производится по формуле

$$T_{i+1}(j, r) = T_{i+1}(j, r) + GT(T_i(j, r-1) - 2T_i(j, r) + T_i(j, r+1)). \quad (5)$$

Изменение температур внешних точек для левой и правой границ основания находится по формулам

$$T_{i+1}(j, 0) = T_{i+1}(j, 0) + GT_2(T_i(j, 1) - T_i(j, 0)) + GC(T_c - T_i(j, 0)) + GR_1(T_k - (T_i(j, 0) + K)^4); \quad (6)$$

$$T_{i+1}(j, N_3) = T_{i+1}(j, N_3) + GT_2(T_i(j, N_3 - 1) - T_i(j, N_3)) + GC(T_c - T_i(j, N_3)) + GR_1(T_k - (T_i(j, N_3) + K)^4). \quad (7)$$

Рассчитываются значения температур внутренних точек по длине наплавленного слоя металла при $r = \overline{k_b + 1, k_f - 1}$ по формуле (5).

Определяются температуры внешних точек для левой границы слоя:

$$T_{i+1}(j, k_b) = T_{i+1}(j, k_b) + GT_2(T_i(j, k_b + 1) - T_i(j, k_b)) + GC(T_c - T_i(j, k_b)) + GR_2(T_k - (T_i(j, k_b) + K)^4) \quad (8)$$

и правой:

$$T_{i+1}(j, k_f) = T_{i+1}(j, k_f) + GT_2(T_i(j, k_f - 1) - T_i(j, k_f)) + GC(T_c - T_i(j, k_f)) + GR_2(T_k - (T_i(j, k_f) + K)^4). \quad (9)$$

Определяется температурное распределение по длине наплавленного слоя с учетом наплавления новых частей металла $r_f > 1$ для внутренних точек по формуле (5) при $r = \overline{k_b + 1, k_b + r_f - 1}$, для левой границы по формуле (8) при $j = \overline{N_1 + 1, N}$ и для правой границы $r_r = \overline{k_b + r_f - 1}$ по формуле

$$T_{i+1}(j, r_r) = T_{i+1}(j, r_r) + GT_2(T_i(j, r_r - 1) - T_i(j, r_r)) + GC(T_c - T_i(j, r_r)) + GR_2(T_k - (T_i(j, r_r) + K)^4). \quad (10)$$

Программная реализация расчета температурного поля в процессе послойной электродуговой наплавки

Приведенные формулы позволяют определить распределение температуры по всей конструкции в процессе послойной электродуговой наплавки новых слоев металла. При использовании принудительного охлаждения наплавленной части изделия коэффициент GC принимается равным GC_2 . Для определения температурного распределения в наплаваемой конструкции используется функция TempSurfacing (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2025-1/14.jpg>).

В процессе наплавления новой части слоя температура на границе определяется путем взвешивания температур соседней точки и расплава T_m с весами w_1 и w_2 соответственно. Для одинаковых по характеристикам материалов подложки и наплавки можно принять $w_1 = w_2 = 0,5$. В процессе наплавки последующих слоев металла ($sl > 1$) для расчета температурного поля в формулах (2)–(10) осуществляется корректировка количества слоев для основания $N_1 = N_1 + N_2$ и для всей конструкции $N = N + N_2$.

Учет зависимости теплофизических свойств металла (коэффициенты теплопроводности λ и теплоемкости C) от температуры производится перед наплавкой нового слоя функцией TempDepend. Код функции:

```
function [lam,a,dtau_max]=TempDepend(mas,ro);
global dL Tb Tt lam1 lam2 C1 C2
mas1=nonzeros(mas);
sm=sum(mas1)/length(mas1); % средняя температура
if (sm<=Tb)
    lam=lam1; C=C1;
elseif (sm>=Tt)
    lam=lam2; C=C2;
else
    lam=lam1+(sm-Tb)*(lam2-lam1)/(Tt-Tb); C=C1+(sm-Tb)*(C2-C1)/(Tt-Tb); end;
a=lam/(ro*C);
```

Рассчитывается средняя температура наплавленной конструкции sm . При этом, если sm не больше нижнего или не меньше верхнего граничных значений температур T_b и T_t , то значения коэффициентов λ и C берутся из справочных данных для температур соответственно. В противном случае коэффициенты находятся путем линейной интерполяции. На основании полученных коэффициентов корректируется значение коэффициента теплопроводности a .

Приведенные функции программы позволяют рассчитать температурное поле в наплавляемой конструкции на всех этапах аддитивного производства с учетом изменения тепло- и температуропроводности стали в зависимости от температуры, а также принудительного конвективного охлаждения в процессе межслойной выдержки.

Для проверки работоспособности программы с помощью функции TempSurfacing был произведен расчет температурного поля в процессе послойной электродуговой наплавки одного слоя металла при следующих исходных данных: $B = 100$ мм, $B_1 = 125$ мм, $B_2 = 70$ мм, $\Delta B = 20$ мм, $L_1 = 5$ мм, $L_2 = 2$ мм, $\Delta L = 1$ мм, $\Delta t = 0,01$ с, сталь 09Г2С, $\lambda = 80$ Вт/(м·град.), $\alpha = 12$ Вт/(м²·град.), $C = 460$ Дж/(кг·К), $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$, $\rho = 7800$ кг/м³, $T_0 = 20$ °С, $T_b = 20$ °С, $T_t = 1\ 000$ °С, $\lambda_1 = 55$ Вт/(м·град.), $\lambda_2 = 28$ Вт/(м·град.), $C_1 = 470$ Дж/(кг·К), $C_2 = 690$ Дж/(кг·К).

На рабочем экране программы вводятся исходные данные и представляются результаты моделирования в численном виде (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2025-1/28.jpg>).

Результаты моделирования температурного поля отражаются в двухмерных пространственных координатах (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2025-1/15.jpg>), температурное поле наплавленной конструкции – в графическом виде (рис. 3).

Заключение

Разработанная программа для моделирования температурного поля в металлических

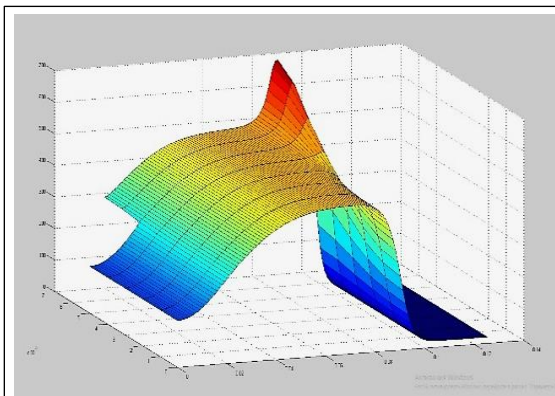


Рис. 3. Результаты моделирования температурного поля с помощью функции TempSurfacing в графическом виде

Fig. 3. Graphical results of temperature field modeling with TempSurfacing function

изделиях позволяет определить температурное распределение в конструкции при послойной электродуговой наплавке металла. Полученная модель температурного поля используется для определения оптимального термического цикла процесса аддитивного производства металлических изделий. Приведенная методика позволяет рассчитать температурное поле с учетом особенностей переноса тепла в процессе аддитивного производства металлических изделий и перейти к решению задач моделирования для изделий сложной геометрической формы. Полученную модель можно в дальнейшем использовать для идентификации условий теплообмена с учетом изменения рабочих параметров технологического процесса послойной электродуговой наплавки металла.

Список литературы

1. Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю., Марголис Б.И. Способ аддитивного производства металлических изделий // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21. № 4. С. 75–80. doi: 10.22213/2410-9304-2023-4-75-80.
2. Палаев А.Г., Носов В.В., Красников А.А. Моделирование распределения температурных полей и напряжений в сварном соединении с применением ANSYS // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Т. 12. № 5. С. 461–469. doi: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469.
3. Кулагин А.Г. Математическая модель переноса расплавленного металла при дуговой сварке в среде защитных газов // Ползуновский альманах. 2022. Т. 2. № 4. С. 38–50.
4. Быков А.Н., Вишнякова М.Н., Дерюгин Ю.Н. и др. Численное моделирование селективного лазерного плавления методом SPH // Журнал Средневолжского математического общества. 2022. Т. 24. № 4. С. 419–435. doi: 10.15507/2079-6900.24.202204.419-435.
5. Григорьянц А.Г. Моделирование процесса селективного лазерного плавления в аддитивном производстве // Научно-технические проблемы машиностроения. 2023. № 10. С. 20–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-29.
6. Черных Н.Ю., Гусева Е.А. Моделирование процессов аддитивного производства // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. XV Всерос. науч.-технич. конф. 2021. С. 120–126.
7. Салихова Н.К., Осолков А.А., Келлер И.Э., Трушников Д.Н. Численное моделирование процесса 3D-наплавки проволочных материалов и согласованный термомеханический анализ // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: сб. тезисов докладов. 2023. Т. 3. С. 168–169.
8. Тихомиров С.А., Тихомиров К.С. Математическое моделирование нестационарного конвективного охлаждения многослойных тел при аддитивном производстве изделий // Инженерный вестн. Дона. 2022. № 7. С. 170–191.

9. Рыльков Е.Н., Курушкин Д.В., Кладов И.В., Панченко О.В. Конечно-элементная модель тепловых процессов при послойной электродуговой наплавке для оценки деформаций и напряженного состояния // Сварка и диагностика. 2020. № 3. С. 25–29.

10. Галимов В.Р., Лазунова В.О. Сравнение аналитической и численной модели расчета температурного поля при линейной сварке трением // Молодежный вестн. УГАТУ. 2020. № 2. С. 23–26.

11. Зыбин И.Н., Антохин М.С. Численное моделирование температурных полей при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава AA5083 // Frontier Materials & Technologies. 2023. № 1. С. 23–32. doi: 10.18323/2782-4039-2023-1-23-32.

Software & Systems

doi: 10.15827/0236-235X.149.143-149

2025, 38(1), pp. 143–149

Temperature field modeling in additive manufacturing of metal products

Daniil D. Kakorin ¹, Boris I. Margolis ¹✉¹ Tver State Technical University, Tver, 170026, Russian Federation

For citation

Kakorin, D.D., Margolis, B.I. (2025) 'Temperature field modeling in additive manufacturing of metal products', *Software & Systems*, 38(1), pp. 143–149 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.149.143-149

Article info

Received: 08.04.2024

After revision: 25.04.2024

Accepted: 26.04.2024

Abstract. The paper substantiates the necessity to study the nature of temperature distribution in additive manufacturing of metal products. It considers the peculiarities of modeling a temperature field, which arises during layer-by-layer electric arc welding of flat geometric metal parts taking into account asymmetric convection-radiation heat exchange between the surface and the environment. The authors described in detail the temperature field calculation in two-dimensional spatial coordinates based on numerical finite-difference methods. They took into account the possibility of shifting the starting point of the welded layer from the base edge, changing the holding time between the welded layers and the use of forced air metal cooling. The authors considered the mechanism of temperature determination in the structure boundary points, directly in contact with the molten metal. They also developed a program in MatLab that allows modeling the temperature field in the product based on specified thermophysical characteristics of the clad metal, parameters of convective-radiation heat exchange and geometric characteristics of the welded structure. The paper gives texts of TempSurfacing functions for modeling the temperature field and TempDepend for taking into account the dependence of thermophysical properties of metal on its temperature before surfacing a new layer. The authors checked the performance of the program on the example of surfacing a single layer of metal 2 mm high on a metal base 5 mm high. There is a view of the program window for inputting initial data, and the results of modeling the temperature field in two-dimensional spatial coordinates in text and graphical forms. The obtained temperature field model allows taking into account the new metal parts addition along the welded layer length, as well as the systematic increase in the structure height due to layer-by-layer metal welding. The developed model serves to establish the optimal thermal cycle of the layer-by-layer arc welding process and to identify the heat transfer conditions taking into account changes in the operating parameters of the additive manufacturing technological process.

Keywords: modeling, temperature field, additive manufacturing, convection-radiation heat exchange, finite-difference methods, program, MatLab, electric arc welding

References

1. Kakorin, D.D., Lavrentiev, A.Yu., Margolis, B.I. (2023) 'Method of additive manufacturing of metal products', *Intellekt. Sist. Proizv.*, 21(4), pp. 75–80 (in Russ.). doi: 10.22213/2410-9304-2023-4-75-80.

2. Palaev, A.G., Nosov, V.V., Krasnikov, A.A. (2022) 'Simulating distribution of temperature fields and stresses in welded joint using ANSYS', *Sci. & Tech.: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 12(5), pp. 461–469 (in Russ.). doi: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469.

3. Kulagin, A.G. 'Mathematical model of molten metal transfer during shielded gas arc welding', *Polzunov Almanac*, 4(2), pp. 38–50 (in Russ.).

4. Bykov, A.N., Vishnyakova, M.N., Deryugin, Yu.N. et al. (2022) 'Numerical simulation of selective laser melting by the SPH method', *Middle Volga Math. Society J.*, 24(4), pp. 419–435 (in Russ.). doi: 10.15507/2079-6900.24.202204.419-435.

5. Grigoryants, A.G. (2023) 'Modeling of the selective laser melting process in additive manufacturing', *Sci. Intensive Tech. in Mech. Eng.*, 23(10), pp. 20–29 (in Russ.). doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-29.

6. Chernykh, N.Yu., Guseva, E.A. (2021) 'Modeling of additive manufacturing processes', *Proc. XV All-Russ. Sci. and Tech. Conf. Aircraft Engineering and Transport of Siberia*, pp. 120–126 (in Russ.).
7. Salikhova, N.K., Oskolkov, A.A., Keller, I.E., Trushnikov, D.N. (2023) 'Numerical modeling of 3D wire melting process and coordinated thermomechanical analysis', *Proc. XIII All-Russian Congress on Theoretical and Applied Mechanics*, 3, pp. 168–169 (in Russ.).
8. Tikhomirov, S.A., Tikhomirov, K.S. (2022) 'Mathematical modeling of non-stationary cooling 3d-printed multilayer objects', *Engineering J. of Don*, (7), pp. 170–191 (in Russ.).
9. Rylkov, E.N., Kurushkin, D.V., Kladov, I.V., Panchenko, O.V. (2020) 'The ultimate elemental model of thermal processes in layered electrode surfacing to assess deformations and tense state', *Welding and Diagnostics*, (3), pp. 25–29 (in Russ.).
10. Galimov, V.R., Lazunova, V.O. (2020) 'Analysis and numerical model comparison of temperature field calculation for linear friction welding', *Youth Bull. of the USATU*, (2), pp. 23–26 (in Russ.).
11. Zybin, I.N., Antokhin, M.S. (2023) 'Numerical modeling of temperature fields during friction stir welding of the AA5083 aluminum alloy', *Frontier Materials & Technologies*, (1), pp. 23–32 (in Russ.). doi: 10.18323/2782-4039-2023-1-23-32.

Авторы

Какорин Даниил Дмитриевич¹,
аспирант, kakorin0000@gmail.com
Марголис Борис Иосифович¹, д.т.н.,
профессор, borismargolis@yandex.ru

¹ Тверской государственный технический
университет, г. Тверь, 170026, Россия

Authors

Daniil D. Kakorin¹, Postgraduate Student,
kakorin0000@gmail.com
Boris I. Margolis¹, Dr.Sci. (Engineering),
Professor, borismargolis@yandex.ru

¹ Tver State Technical University,
Tver, 170026, Russian Federation