УДК 621.791.9, 621.7-52 doi: 10.15827/0236-235X.150.366-373 2025. Т. 38. № 2. С. 366–373

Разработка программы моделирования температурного поля для процесса послойного электродугового наплавления металлических изделий

Д.Д. Какорин [1], Б.И. Марголис [1]✉

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

Ссылка для цитирования
Какорин Д.Д., Марголис Б.И. Разработка программы моделирования температурного поля для процесса послойного электродугового наплавления металлических изделий // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38. № 2. С. 366–373. doi: 10.15827/0236-235X.150.366-373
Информация о статье
Группа специальностей ВАК: 2.3.3
Поступила в редакцию: 27.05.2024 После доработки: 08.08.2024 Принята к публикации: 20.08.2024

Аннотация. В статье проведен краткий обзор программ для моделирования температурных полей при аддитивном производстве металлических изделий, выделены основные недостатки разработанных моделей применительно к послойной электродуговой наплавке присадочной проволоки. Описана процедура идентификации параметров теплообмена при моделировании температурного поля в процессе послойной электродуговой наплавки металла. Определены основные и второстепенные механизмы теплообмена в стали. Описан процесс экспериментального определения температуры наплавленного металла во время технологической выдержки с представлением результатов измерений. Проведен анализ изменения температуры металла с выделением наиболее вероятных причин резкого экспоненциального охлаждения в начале этапа технологической выдержки. С учетом использованных в эксперименте исходных данных выполнено математическое моделирование температурного поля для этапов послойного наплавления и технологической выдержки с помощью функций TempSurfacing и TempRest соответственно. Учет изменяющихся параметров теплопроводности и теплоемкости стали в зависимости от температуры осуществлялся функцией TempDepend. Результаты моделирования представлены в виде графика температурного поля по длине и высоте конструкции. Численное моделирование температурного поля показало значительное расхождение экспериментальных и расчетных значений температур в процессе наплавления слоя металла. В качестве основной причины несоответствия показателей установлено отсутствие возможности учета программой всех особенностей распределения тепла в массивном теле. Предложено провести идентификацию весовых коэффициентов основания и наплавляемого металла и коэффициентов вынужденного конвективного теплообмена. Для этого в программу добавлены функции идентификации оптимальных значений весовых коэффициентов для этапа наплавления и определения коэффициентов конвективного теплообмена для этапа технологической выдержки. При моделировании температурного поля для идентифицированных параметров теплообмена получено минимальное отклонение расчетных значений температур от экспериментальных. Таким образом, произведена корректировка программы моделирования температурного поля в двухмерных пространственных координатах для металлических изделий простой геометрической формы с учетом массивности конструкции без существенного усложнения рабочих функций и увеличения времени вычислительных операций. Программа моделирования температурного поля может быть использована для разработки технологического режима при различных геометрических характеристиках наплавляемой конструкции. Ее применение позволит сократить затраты на изготовление опытных и экспериментальных образцов и оптимизировать время технологической выдержки.

Ключевые слова: программа, численное моделирование, идентификация, MATLAB, функция, аддитивное производство, температурное поле, параметры теплообмена, оптимизация

Введение. Стремительное развитие промышленности невозможно без внедрения новых производственных технологий. Одним из актуальных направлений является разработка технологий, позволяющих быстро воспроизводить изделия различной геометрической формы и размеров без значительных затрат на наладку и переоборудование производства. Решить поставленную задачу удалось благодаря созданию технологий аддитивного производства, заключающихся в послойном нанесении проволочных или порошковых присадочных материалов на металлическое основание. Однако достичь высокого качества структуры и геометрии металлических изделий при их аддитивном производстве невозможно без использования программ для предварительного моделирования температурных полей и оценки влияния технологических параметров режима послойного построения на качество наплавленного металла.

Сегодня большое внимание уделяется исследованиям в области аддитивного производства с использованием лазерных и электронно-лучевых источников тепловой энергии. Например, в работе [1] описано применение одноуровневой математической модели, позволяющей определить влияние скорости наплавления, мощности

и радиуса источника теплоты на размеры ванны расплава и зоны термического влияния при послойном лазерном наплавлении присадочной проволоки. Недостатком приведенной модели является ее ограниченное применение из-за отсутствия возможности перехода от локального исследования области наплавления слоя к моделированию температурного распределения по всей высоте конструкции. Математическая модель из [2] позволяет определять температурное поле в металлическом изделии при аддитивном производстве методом селективного лазерного плавления порошкового материала. Для оценки точности системы моделирования было проведено сопоставление расчетных результатов с экспериментальными. В [3] представлена математическая модель для описания процессов передачи тепла и фазовых переходов в металле при послойном селективном лазерном спекании и наплавлении порошкового материла.

Основным недостатком приведенных выше работ является их ограниченное промышленное применение, связанное с низкой производительностью технологий лазерного спекания и наплавления порошковых материалов. Кроме того, перечисленные методы расчета температурного поля в процессе лазерного спекания или наплавления [4–6] не могут быть задействованы для моделирования тепловых процессов при электродуговом наплавлении присадочной проволоки.

Проведенный анализ известных методов моделирования показал, что для расчета температурного поля, как правило, большее внимание уделяют основным механизмам и условиям теплопереноса, пренебрегая факторами, оказывающими второстепенное влияние на формирование температурного поля [7, 8]. При этом доля факторов, не учтенных в процессе моделирования температурного поля, может быть различной. Для металлов основными механизмами теплопереноса являются внутренний теплообмен и конвективный теплоперенос с внешних поверхностей изделия [9]. Для большинства процессов аддитивного производства, где рабочая зона наплавления не имеет близко расположенных ограничивающих поверхностей, второстепенным будет радиационный или лучистый теплообмен [10].

Таким образом, задачей научного исследования является создание программы для численного моделирования температурного поля в металлических изделиях при их аддитивном производстве, позволяющей учесть второстепенные факторы процесса и повысить точность вычислительных операций.

Научная новизна проведенного исследования заключается в разработке метода моделирования температурного поля, возникающего в процессе послойного электродугового наплавления металла, с идентификацией параметров теплообмена в зависимости от режима аддитивного производства. По сравнению с приведенными аналогами полученный метод расчета температурного поля позволяет учесть различные механизмы теплообмена во внутренних и внешних точках изделия, радиационный теплообмен поверхности изделия с окружающими телами, необходимость принудительного охлаждения металла в ходе технологической выдержки, а также изменение теплофизических свойств металла в зависимости от его текущей температуры. Идентификация параметров теплообмена необходима для компенсации массивности металлического основания за счет изменения интенсивности теплообменных процессов в точке контакта присадочного металла с поверхностью основания, а также подбора скорости конвективного охлаждения изделия на этапе выдержки и обеспечения требуемой температуры металла.

Экспериментальное определение температуры наплавленного металла

Практическая отработка технологии послойного электродугового наплавления осуществляется путем изготовления образца из низкоуглеродистой стали марки 09Г2С, состоящего из металлической пластины-основания высотой $L_1 = 6$ мм, длиной $B_1 = 126$ мм и стенки длиной $B_2 = 70$ мм и высотой $L = 12$ мм (рис. 1). Режим электродугового наплавления, параметрами которого являются сила тока I = 170 А, напряжение электрической дуги U = 18,4 В и скорость подачи проволоки V_H = 600 мм/мин., установлен на основе результатов, полученных в ходе оптимизации параметров режима электродугового наплавления металла [11].

Высота одного наплавленного слоя металла L_2 составляет 2 мм, общее количество наплавленных слоев равно 6.

Процесс послойного наплавления экспериментального образца состоял из двух чередующихся этапов: наплавления металла длительностью 7 сек. и технологической выдержки в течение 120 сек. Измерение температуры производилось в средней по длине точке каждого наплавленного слоя на протяжении всего этапа

технологической выдержки. Запись температуры осуществлялась с шагом $\Delta\tau = 1$ с пирометрическим устройством для дистанционного измерения температуры. Полученные результаты измерений представлены на рисунке 2 для каждого слоя металла.

На графиках видно, что в течение выдержки скорость охлаждения наплавленного металла изменяется с 20 до 0,5 °С/сек. Существенное различие между объемами пластины-основания и наплавленного слоя, при котором основание составляет 80–95 % конструкции, является причиной высокой скорости распространения тепла в металле. Разница объемов приводит к возникновению резкого температурного градиента в момент окончания наплавления металла между нижней поверхностью пластины-основания и новыми наплавленными частями конструкции с локальной температурой более 1 100 °С. Данная особенность способствует активному поглощению тепла пластиной-основанием и экспоненциальным падением скорости охлаждения в процессе установления равновесной температуры по всему объему изделия.

Рис. 1. Экспериментальный образец

Fig. 1. Experimental sample

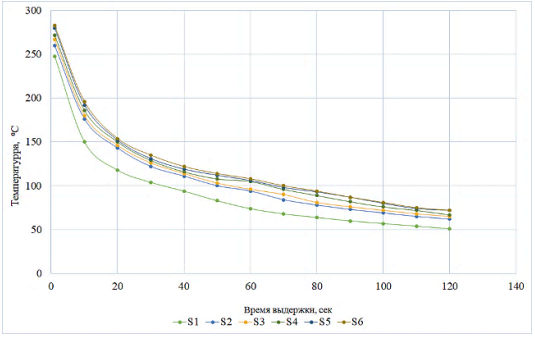


Рис. 2. Изменение температуры наплавленных слоев металла на этапе технологической выдержки

Fig. 2. Temperature change in clad metal layers at the technological soaking stage

Моделирование температурного поля при послойной наплавке металла

Для проверки программы расчета температурного распределения в наплавляемой конструкции необходимо провести моделирование температурного поля на основе исходных данных эксперимента. Дополнительно в программу требуется ввести расстояние от края основания до начала наплавляемого слоя $\Delta B = 28$ мм, параметры весовых коэффициентов $w_1 = w_2 = 0{,}5$, а также значения коэффициентов радиационного теплообмена $Es_1 = Es_2 = 0{,}8$ и коэффициентов естественной $\alpha = 12$ Вт/(м^2·К) и вынужденной $\alpha_2 = 110$ Вт/(м^2·К) конвекции. Необходимые для расчета исходные данные загружаются в программу из файла формата Excel.

Расчет изменения температуры в процессе наплавления металла осуществляется с помощью функции TempSurfacing. Для расчета температурного поля в момент технологической выдержки используется функция TempRest, при этом изменение теплофизических свойств наплавленного металла, включающих теплопроводность λ и теплоемкость C стали, при переходе к наплавлению нового слоя осуществляется функцией TempDepend [12].

Для удобства сравнительного анализа экспериментальных и расчетных результатов значения температур в начале ($t = 0$ сек.) и конце ($t = 120$ сек.) этапа технологической выдержки сведены в таблицу.

На основании представленных в таблице 1 данных можно сделать вывод, что расчетные значения температуры имеют значительное расхождение с проведенным экспериментом. Расчетные температуры в конце наплавления слоя превышают экспериментальные показатели на 15–50 %, при этом наибольшее расхождение наблюдается на первом наплавленном слое. Кроме того, различен и характер изменения температуры по времени послойного наплавления. Экспериментальные результаты характеризуются постоянным увеличением температуры наплавленного металла с 263,1 до 298,1 °С, а результаты, полученные при моделировании, напротив, характеризуются постепенным падением температуры металла с 404,1 до 353,5 °С. Данные различия по температуре в конце этапа электродугового наплавления связаны с отсутствием возможности учета всех особенностей распределения тепла в массивном металлическом изделии при построении двухмерной модели температурного поля.

Значения расчетных температур в конце этапа технологической выдержки выше экспе-

Таблица 1

Сводная таблица экспериментальных и расчетных результатов

Table 1

Summary table of experimental and calculated results

t, сек.	Номер и температура наплавленного слоя, ºС											
	1		2		3		4		5		6	
	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р	Э	Р
0	263,1	404,1	275,0	399,5	282,3	380,6	287,1	365,9	295,0	357,4	298,1	353,5
120	51,1	108,3	61,9	138,8	65,1	152,3	67,3	159,5	72,6	163,8	72,8	166,7

риментальных, в том числе и из-за увеличенных значений расчетной температуры наплавленного металла. Изменение экспериментальных и расчетных значений температуры в конце этапа межслойной выдержки имеет одинаковый характер, заключающийся в плавном увеличении температуры наплавленного металла, что говорит о корректной работе функции TempDepend, предназначенной для учета изменения теплофизических характеристик стали от температуры.

Корректировка программы моделирования температурного поля

Анализ результатов расчета температурного поля на этапе наплавления показал необходимость учета массивности металлического основания и специфики формирования температур граничных точек в зоне контакта. Для этого в программе предусмотрены весовые коэффициенты w_1 и w_2, позволяющие взвесить значения температур металла основания и наплавляемого металла для установления температуры в граничной точке. Подбор весовых коэффициентов позволяет уменьшить значение температуры на границе между наплавляемым металлом и поверхностью основания и достичь требуемой температуры металла в конце наплавления слоя. Для определения оптимальных коэффициентов w_1 и w_2 в программу добавлена функция идентификации температуры в конце наплавления слоя Iden1:

```
   function y=Iden1(par)
   global slices Tm Tc N1 N2 N n parts
ifin1 kfin ifin2 T1 GT GT2 GC kbeg kfin1
N1_beg
   global w1 w2 GR1 GR2 Kel Tc1 Tc2
N2_mas sl rest conv Niden T_iden T1_beg
sl_inc
   w1=par(1); w2=1-w1;T1=T1_beg;
   kf=TempSurfacing(sl,rest,conv);
   y=abs(T1(n,Niden,kf)-T_iden);
```

Для снижения расчетной температуры металла на этапе технологической выдержки программа дополнена функцией Iden2:

```
   function y=Iden2(par)
   global slices Tm Tc N1 N2 N n parts
ifin1 kfin ifin2 T1 GT GT2 GC kbeg kfin1
N1_beg
   global w1 w2 GR1 GR2 Kel Tc1 Tc2 GC2
N2_mas sl conv Niden T_iden dL lam T1_beg
   alfa2=par(1);                alfa=alfa2;
GC=GT2*alfa*dL/lam;
   GC2=GT2*alfa2*dL/lam;  % пересчитываем
коэф. при конвективном градиенте
   T1=T1_beg; kf=TempRest(sl,conv);
   y=abs(T1(n,Niden,kf)-T_iden);
```

Функция позволяет идентифицировать коэффициент вынужденного конвективного теплообмена α_2 в зависимости от требуемой температуры металла. Идентификация коэффициента α_2 дает возможность учесть конвективное охлаждение металла не только по длине и высоте, но и по толщине изделия, тем самым искусственно увеличив скорость охлаждения металла на этапе технологической выдержки.

Идентификация параметров теплообмена для наплавления и выдержки осуществляется с помощью стандартного метода MATLAB fminbnd поиска минимума функции одной переменной в заданных границах. За 10–12 шагов метод сходится к значениям параметров, обеспечивающих минимальное отклонение расчетных и экспериментальных значений. Весовые коэффициенты идентифицируются для этапа наплавления в диапазоне от 0 до 1 с точностью TolX 0,001. Коэффициент вынужденного конвективного теплообмена α_2 определяется только для этапа технологической выдержки с точностью TolX = 1. Таким образом, программа при тех же исходных данных осуществляет расчет температурного поля с идентификацией коэффициентов весов и конвективного теплообмена, обеспечивающих минимальное отклонение расчетных значений температур от экспериментальных.

Результаты идентификации параметров приведены в таблице 2, где T_M – значения температур для этапа наплавления металла, T_R – значения температур для этапа технологической выдержки. Температурное поле для пер-

Таблица 2

Результаты идентификации параметров теплообмена

Table 2

Results of heat exchange parameter identification

Параметр	Номер наплавленного слоя					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
w_1	0,8544	0,7536	0,6358	0,5178	0,4047	0,3552
w_2	0,1456	0,2464	0,3642	0,4822	0,5953	0,6448
α_2, Вт/(м^2·К)	174,9490	189,5	219,492	245,8229	256,4851	277,7172
T_M (эксп.), ºС	263	275	282	287	295	298
T_M (расч.), ºС	262,9633	257,0379	282,0242	287,0375	295,0003	298,0283
T_R (эксп.), ºС	51	62	65	67	72	72
T_R (расч.), ºС	50,9986	62,0204	65,0437	66,9966	71,9687	71,9893

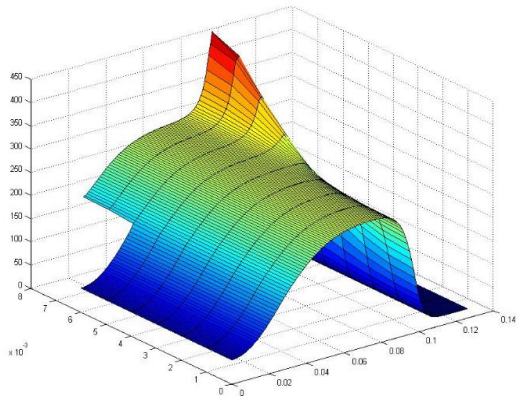
вого слоя металла при расчете с идентифицированными параметрами теплообмена представлено на рисунке 3.

Полученные результаты показывают, что применение функций для идентификации параметров теплообмена в процессе моделирования двухмерного температурного поля при аддитивном производстве металлических изделий позволяет компенсировать отсутствие третьей координаты, учитывающей массивность конструкции, и получить результаты, соответствующие эксперименту. Таким образом, решается проблема моделирования температурного поля в процессе послойного электродугового наплавления металлических изделий простой геометрической формы без значительного усложнения программных функций и увеличения времени вычислительных операций [13–15].

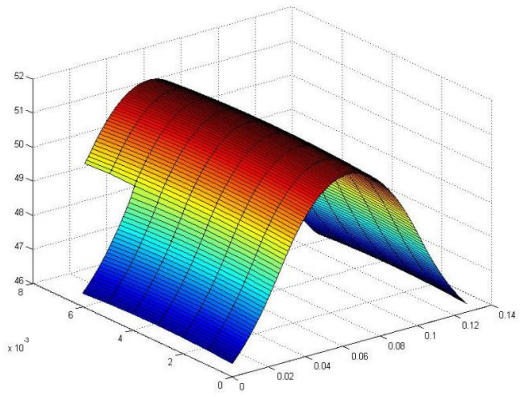
Заключение

Полученная программа моделирования температурного поля и идентификации параметров теплообмена может быть использована для разработки технологического режима при изменении геометрических характеристик наплавляемой конструкции, например, при изготовлении металлических изделий простой геометрической формы типа кронштейн или корпус по технологии аддитивного производства на основе электродугового наплавления присадочной проволоки. Применение программы позволит оптимизировать технологический процесс аддитивного производства, сократить затраты на изготовление опытных и экспериментальных образцов, рассчитать оптимальное время выдержки на основе критической температуры наплавленного металла.

Кроме того, разработанная программа помогает изучить механизмы распределения тепла в металлических изделиях, что облегчит



а)



б)

Рис. 3. Температурное поле при расчете с идентифицированными параметрами теплообмена

Fig. 3. Temperature field in calculation with identified heat exchange parameters

дальнейший переход к решению более сложных задач в области моделирования температурных полей в трехмерных пространственных координатах для изделий, имеющих сложную геометрическую форму и выполненных из различных металлов и сплавов.

Список литературы

1. Гребеньщикова Е.В., Няшина Н.Д. Моделирование влияния управляющих параметров на размеры ванны расплава при аддитивном производстве // Математическое моделирование в естественных науках: матер. Всерос. конф. 2019. Т. 1. С. 45–49.

2. Григорьянц А.Г. Моделирование процесса селективного лазерного плавления в аддитивном производстве // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2023. № 10. С. 20–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-20-29.

3. Цивильский И.В., Гильмутдинов А.Х., Хамидуллин Б.А., Рубля Р.С. Математическое моделирование динамики и фазовых переходов в порошковых материалах в процессе аддитивного производства // XII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при создании материалов нового поколения»: матер. конф. 2020. С. 172–186.

4. Петров М.А., Петров П.А. Компьютерное моделирование процессов аддитивного производства в программах компании MSC // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: матер. IV Междунар. конф. 2018. С. 378–389.

5. Кондратьев Д.В. Топологическая оптимизация и моделирование печати изделий с последующим анализом микроструктуры – решения ANSYS для аддитивного производства // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: матер. IV Междунар. конф. 2020. С. 140–147.

6. Мианджи З., Холопов А.А. Численное и экспериментальное исследования тепловых процессов при выращивании тонкостенных деталей методом коаксиального лазерного плавления металла из нержавеющей стали 316L // Изв. высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 7. С. 19–29. doi: 10.18698/0536-1044-2021-7-19-29.

7. Неулыбин С.Д., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н. и др. Плазменная наплавка: математическая модель, численная реализация и верификация // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 4. С. 7–23. doi: 10.15593/2224-9877/2017.4.01.

8. Турков В.А., Холостова Т.Д. Тепловое моделирование процессов аддитивного производства // Молодежь. Техника. Космос: тр. XI Общерос. науч.-технич. конф. 2019. С. 78–84.

9. 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.

10. Курашкин С.О., Рогова Д.В., Тынченко В.С., Шуткина Е.В. Разработка программного обеспечения для математического моделирования распределения температуры в процессе электронно-лучевой сварки // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 509–517. doi: 10.15827/0236-235X.139.509-517.

11. Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю., Марголис Б.И. Оптимизация режимов послойного наплавления для аддитивного производства металлических изделий // Изв. ТулГУ. Технич. науки. 2024. № 4. С. 550–554.

12. Какорин Д.Д., Марголис Б.И. Моделирование температурных полей при аддитивном производстве металлических изделий // Программные продукты и системы. 2025. Т. 37. № 1. С. 143–149. doi: 10.15827/0236-235X.149.143-149.

13. Курашкин С.О., Тынченко В.С., Мурыгин А.В. Математическое моделирование распределения энергии при вводе в материал изделия луча в процессе электронно-лучевой сварки // Вестн. МЭИ. 2021. № 3. С. 88–95. doi: 10.24160/1993-6982-2021-3-88-95.

14. Черняков Е.Д., Шадрина В.В. Моделирование процесса плазменной сварки // ИТСАУ-2020: сб. тр. XVIII Всерос. конф. 2020. Т. 2. С. 88–95.

15. 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.

Software & Systems doi: 10.15827/0236-235X.150.366-373 2025, 38(2), pp. 366–373

Developing a temperature field modeling program for layered electric arc welding of metal ware

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) ‘Developing a temperature field modeling program for layered electric arc welding of metal ware’, *Software & Systems*, 38(2), pp. 366–373 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.150.366-373

Article info
Received: 27.05.2024 After revision: 08.08.2024 Accepted: 20.08.2024

Abstract. The paper gives a brief review of the programs for modeling temperature fields in additive manufacturing of metal products. It highlights the main drawbacks of the developed models in terms of layered electric arc cladding of filler wire. The authors describe the identification procedure of heat transfer parameters when modeling a temperature field during layered electric arc welding of metal. They identify major and minor mechanisms of heat transfer in steel. The authors describe the process of experimental determining the temperature of welded metal during technological soaking and present measurement results. They analyze the change in the metal temperature, highlighting the most probable causes of the sharp exponential cooling at the beginning of the soaking stage. Taking into account the initial data used in the experiment, they performed mathematical modeling of the temperature field for the stages of layered welding and process soaking using TempSurfacing and TempRest functions, respectively. Depending on temperature, the TempDepend function took into account variable thermal conductivity and heat capacity of steel values. The paper presents the modeling results in the form of a temperature field graph along the length and height of the structure. Numerical modeling of the temperature field showed a significant discrepancy between experimental and calculated temperature values during metal layer welding. The main reason for the inconsistency of indicators is that the program cannot take into account all heat distribution features in a massive body. The authors suggest identifying the weighting coefficients of the base and clad metal, as well as the coefficients of forced convective heat exchange. For this purpose, the functions of optimal values identification of weight coefficients for the welding stage and determining convective heat exchange coefficients for the technological holding stage are added to the program. When modeling a temperature field for the identified heat transfer parameters, the authors obtained the minimum deviation of the calculated temperature values from the experimental ones. Thus, they corrected the temperature field-modeling program in two-dimensional spatial coordinates for simple geometric metal products. It takes into account structure massiveness, does not complicate significantly working functions and does not increase computational operations time. The program of temperature field modeling can be used for technological mode development at different geometrical characteristics of the cladding structure. Its application allows reducing the cost of prototypes and experimental samples manufacturing and optimizing the technological soaking time.
Keywords: program, numerical modeling, identification, heat transfer parameters, MatLab, function, module, additive manufacturing, temperature field, optimization, technological mode

References

1. Grebenshchikova, E.V., Nyashina, N.D. (2019) ‘Simulating the affect of control parameters on melt bath dimensions in additive manufacturing ’, *Proc. All-Russ. Conf. Math. Modeling in Natural Sci.,* 1, pp. 45–49 (in Russ.).

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

3. Tsivilskiy, I.V., Gilmutdinov, A.Kh., Khamidullin, B.A., Rublya, R.S. (2020) ‘Mathematical modeling of dynamics and phase transitions in powder materials during additive manufacturing’, *Proc. XII All.-Russ. Conf. on Testing and Research of TestMat Material Properties on the topic “Modern Aspects in the Field of Researching Structural-Phase Transformations When Creating New Generation Materials”,* pp. 172–186 (in Russ.).

4. Petrov, M.A., Petrov, P.A. (2018) ‘Computer modeling of additive manufacturing processes in MSC programs’, *Proc. IV Int. Conf. Additive Technologies: The Present and the Future,* pp. 378–389 (in Russ.).

5. Kondratev, D.V. (2020) ‘Topology optimization and modeling of product printing with subsequent microstructure analysis – ANSYS solutions for additive manufacturing’, *Proc. VI Int. Conf. Additive Technologies: The Present and the Future,* pp. 140–147 (in Russ.).

6. Miandzhi, Z., Kholopov, A.A. (2021) ‘Numerical and experimental study of thermal processes during the growth of thin-walled parts by coaxial laser melting from stainless steel 316L’, *BMSTU J. of Mechanical Eng.*, (7), pp. 19–29 (in Russ.). doi: 10.18698/0536-1044-2021-7-19-29.

7. Neulybin, S., Permyakov, G., Trushnikov, D., Shchitsyn, I., Belenkiy, V., Belinin, D. (2017) ‘Plasma surfacing: mathematical model, numerical implementation and verification’, *PNIPU Bull. The Mechanical Eng, Materials Sci*., 19(4), pp. 7–23 (in Russ.). doi: 10.15593/2224-9877/2017.4.01.

8. Turkov, V.A., Kholostova, T.D. (2019) “Thermal modeling of additive manufacturing processes”, *Proc. Csi. Tech. Conf. Youth. Technology. Spase*, pp. 78–84 (in Russ.).

9. Tikhomirov, S.A., Tikhomirov, K.S. (2022) ‘Mathematical modeling of non-stationary cooling 3d-printed multilayer objects’, *Eng. J. of Don*, (7), pp. 170–191 (in Russ.).

10. Kurashkin, S.O., Tynchenko, V.S., Rogova, D.V., Shutkina, E.V. (2022) ‘Developing software for mathematical modeling of temperature distribution in the process of electron beam welding’, *Software & Systems,* 35(3), pp. 509–517 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.139.509-517.

11. Kakorin, D.D., Lavrentev, A.Ju., Margolis, B.I. (2024) ‘Optimization of the models of layered electric arc welding for additive manufacturing of metal products’, *Proc. of the TSU. Tech. Sci*., (4), pp. 550–554 (in Russ.).

12. Kakorin, D.D., Margolis, B.I. ‘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.

13. Kurashkin, S.O., Tynchenko, V.S., Murygin, A.V. (2021) ‘Mathematical modeling of energy distribution in entering a beam into the workpiece material in the course of electron beam welding’, *Vestn. MEI,* (3), pp. 88–95 (in Russ.). doi: 10.24160/1993-6982-2021-3-88-95.

14. Chernjakov, E.D., Shadrina, V.V. (2020) ‘Моделирование процесса плазменной сварки’, *Proc. XVIII All-Russ. Conf. Information Technology, Systems Analysis and Management*, 2, pp. 88–95 (in Russ.).

15. Rylkov, E.N., Kurushkin, D.V., Kladov, I.V., Panchenko, O.V. (2020) ‘Конечно-элементная модель тепловых процессов при послойной электродуговой наплавке для оценки деформаций и напряженного состояния’, *Welding and Diagnostics*, (3), pp. 25–29 (in Russ.).

Авторы

Какорин Даниил Дмитриевич [1],
аспирант, kakorin0000@gmail.com
Марголис Борис Иосифович [1], д.т.н.,
профессор, зав. кафедрой,
borismargolis@yandex.ru

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

Authors

Daniil D. Kakorin [1], Postgraduate Student,
kakorin0000@gmail.com
Boris I. Margolis [1], Dr.Sci. (Engineering),
Professor, Head of Chair,
borismargolis@yandex.ru

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