

УДК 621.791.72.01:536.4:62.50

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОДВИЖНОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ИСТОЧНИКА

В. В. Мелюков, А. Ф. Заборянский, Б. А. Шишов

Вятский Государственный технический университет,
г. Киров, Россия

А. Н. Семенов

Научно-исследовательский конструкторский институт энерготехники,
Москва, Россия

Для снижения уровня остаточных деформаций и напряжений и повышения качества изделий при обработке концентрированными источниками энергии предложена модель теплового процесса обработки материалов с оценкой термомодеформационного состояния. При построении модели учтены скорость перемещения источника и распределенность плотности мощности. Предложена последовательность исследования термомодеформационного состояния в случае оптимизации теплового процесса обработки.

Основными особенностями воздействия на материалы концентрированного источника при сварке, резке и других видах обработки являются локальность и подвижность, которые приводят к неравномерному нагреву и возникновению местных деформаций и напряжений в обрабатываемом изделии. Результаты исследований показывают [1—3], что тепловые процессы, возникающие при воздействии концентрированных источников энергии на материалы, определяют структурные превращения, фазовые переходы в металлах, деформации и напряжения в процессе обработки, величину остаточных напряжений и деформаций обрабатываемого изделия, т. е. характер тепловых процессов существенно влияет на свойства материала и определяет качество изделия после обработки. Поэтому тепловая модель является моделью первого приближения при определении режима воздействия источника и исследования термомодеформационного состояния обрабатываемого материала изделия.

Математической моделью теплового процесса является уравнение теплопроводности, которое описывает тепловой процесс как систему с причинно-следственной связью, где причиной, возбуждающей тепловой процесс в теле, является источник с удельным тепловым потоком q , а следствием является один из основных параметров теплового процесса — температура тела T .

Решение уравнения теплопроводности, полученное в виде зависимости

$$T = T(x, y, z, t, q, C_v, a, V), \quad (1)$$

определяет при заданных краевых условиях температуру (следствие) в зависимости от величины q (причины) и относится к решению прямой задачи теплопроводности. Решение этой задачи соответствует причинно-следственной связи, существующей в реальном процессе нагрева тела. Система координатных осей x, y, z связана с источником, перемещающимся со скоростью V относительно неподвижной системы, связанной с обрабатываемым телом. Теплофизические свойства материала определяются удельной объемной теплоемкостью C_v и коэффициентом температуропроводности a , t — время.

Если решение уравнения теплопроводности записать в виде зависимости

$$q = q(x, y, z, t, T, C_v, \alpha, V), \quad (2)$$

то причинно-следственная связь, существующая в физической модели, в этой зависимости нарушается, так как температура нагреваемого тела не создает источника нагрева, т. е. обратного процесса нагрева в реальных условиях нельзя воспроизвести. Поэтому зависимость (2) возможна только при математической формализации процесса теплопроводности в целях восстановления причины q , но в реальных условиях эта зависимость некорректна [4].

В общем случае восстановление причинных параметров теплового процесса по определенной информации о температурном поле в теле на основе математического моделирования является решением обратной задачи теплообмена. Зависимость (2) относится к решению одной из обратных задач теплообмена, в которой восстанавливается режим воздействия источника q по заданному распределению температуры T' [5].

При построении заданного распределения температуры T' должны учитываться условия, при которых обеспечиваются необходимые свойства и качество обрабатываемого материала. Эти условия, определяющие основные свойства материала, весьма разнообразны. Они зависят от вида обработки (сварка, локальная термическая обработка, термическая резка, наплавка, косметическая обработка и т. д.), исходных свойств материала (состав, структура, теплофизические характеристики), условий обработки (вид источника, область его воздействия, размеры зоны обработки, градиент температур, скорость и максимальные температуры нагрева, их распределение по длине и ширине зоны обработки), от требований, предъявляемых к изделию в процессе обработки.

Одно из наиболее важных и распространенных требований, предъявляемых, например, к сварным конструкциям, — снижение уровня пластических деформаций и остаточных напряжений.

Для уменьшения внутренних напряжений в изделиях обычно применяют различные виды отпуска. Отпуск сварных конструкций снижает остаточные напряжения, устраняет перемещения, возникающие после сварки, и улучшает свойства металла сварного соединения [6].

Для сварных соединений небольшой толщины можно применить локальную термическую обработку подвижным концентрированным источником нагрева [7]. Такую обработку можно осуществлять непосредственно в процессе сварки с применением сопутствующего подогрева или после сварки при охлаждении до заданной температуры.

При локальной термической обработке сварного соединения подвижным концентрированным источником с сопутствующим подогревом в процессе сварки необходимо формировать сложный термический цикл в каждой точке зоны обработки. В настоящее время сварку с сопутствующим подогревом (предварительным и последующим) наиболее широко применяют в технологии электронно-лучевой сварки для регулирования параметров термического цикла. Для управления последним пучок электронов отклоняют вдоль направления сварки (вперед на кромки стыка и назад в зону сварного шва) и одновременно модулируют его удельную мощность.

Недостатком этих способов обработки с формированием сложного термического цикла является отсутствие разработанных применительно к этим способам количественных моделей и методов выбора основных параметров развертки и отклонения электронного луча, что не позволяет построить критерий качества и оптимизировать процесс нагрева при предварительном подогреве стыка и последующей локальной термической обработке сварного шва одновременно в процессе сварки.

Управление всем комплексом параметров термического цикла, включающим стадии нагрева, охлаждения и термической обработки, связано с усложнением режима теплового воздействия, с разработкой нового источника теплоты, имеющего нетрадиционные формы пятна нагрева и распределения плотности теплового потока. Расчет такого источника теплоты, обеспечивающего оптимальные значения всех заданных параметров термического цикла, возможен при построении в математической модели (2) заданного распределения температуры T' и оптимизации теплового процесса, при котором создаются реальные термические циклы с наилучшим приближением к заданному термическому циклу.

Построение заданного распределения температуры T' и решение задачи оптимального управления тепловым процессом в пластине при воздействии подвижного источника энергии рассмотрены в работе [8]. На рис. 1 изображено распределение температуры $T'(x, y)$ в подвижной системе координат Ox, y , связанной с источником, который перемещается со скоростью V относительно изделия (системы $O_0x_0y_0$).

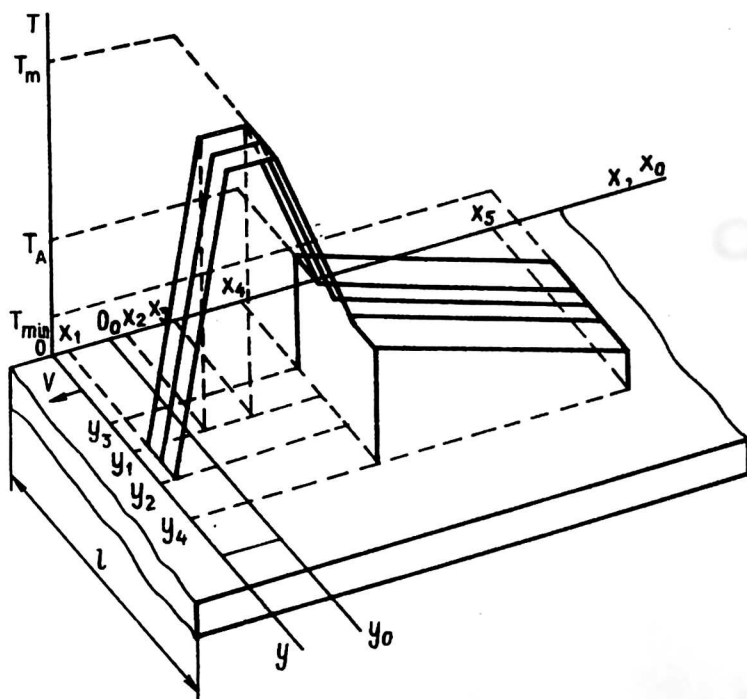


Рис. 1. Заданное распределение температуры $T'(x, y)$

Используя преобразование координат

$$x = x_0 + Vt, \quad y = y_0,$$

из выражения $T'(x, y)$ получим функцию $T'(x_0, y_0, t)$, определяющую заданные термические циклы в каждой точке с координатами x_0, y_0 . Заданная ширина $y_2 - y_1$ определяет зону нагрева до максимальной температуры T_m (например, температуры плавления при сварке), а заданная ширина $y_4 - y_3$ — зону локальной термической обработки. Скорость охлаждения в интервале температур (T_A, T_{\min}) определяется выражением

$$\omega = (T_A - T_{\min})V / (x_5 - x_4).$$

Задавая необходимые параметры термических циклов, построим выражение $T'(x, y)$ заданного распределения температуры. Следует заметить, что заданное

распределение температуры T' строится для моделирования термомодеформационного состояния в процессе сварки с сопутствующим подогревом, если T_m задается больше температуры плавления материала. В случае, когда T_m соответствует температуре отпуска или закалки, исследуется термомодеформационный процесс локальной термической обработки.

Задача исследования термомодеформационного состояния при оптимизации теплового процесса решается в следующей последовательности:

1. По заданным параметрам совокупности термических циклов строится заданное распределение температуры T' .

2. Из решения обратной задачи (2) определяется распределенный источник нагрева (форма пятна нагрева и пространственно-временная структура распределения мощности). Характерная особенность такого оптимального источника — разделение его на два независимых источника и более.

3. Для полученного источника решается прямая задача (1) и определяются истинные температуры T в зоне обработки.

4. Определяются деформации и напряжения, возникающие при этом распределении температуры в зоне обработки.

Пункт 2, связанный с определением источника, решается при помощи методов теории управления [8], а для исследования деформаций и напряжений рассмотрена задача одноосного напряженного состояния при идеальной упруго-пластической диаграмме и с учетом зависимости предела текучести σ_T материала от температуры [9].

Для расчета оптимального теплового процесса (2), построения температурного поля (1) и расчета временных и остаточных деформаций и напряжений разработано программное обеспечение, позволяющее получить на экране наглядное графическое изображение распределенного источника нагрева, температурных профилей, термических циклов, изотерм температур и диаграмм деформаций и напряжений.

Для примера рассмотрим численное моделирование процесса сварки пластин подвижным источником в частном случае заданного распределения температур, определим температурное поле и соответствующие деформации и напряжения.

Температурное поле $T'(x, y)$ получено при моделировании теплового процесса сварки пластин из сплава циркония при следующих исходных данных:

$l = 10$ см; $y_1 = y_3 = 4,6$ см; $y_2 = y_4 = 5,4$ см; $x_1 = 0$; $x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = 1$ см; $T_m = 2000$ °С;

$T_{\min} = 0$ °С; $q = 10^4$ Вт/см³; $V = 1$ см/с; $c_v = 2,07$ Дж/(см³·°С); $\alpha = 0,1$ см²/с.

Пятно нагрева источника в этом случае имеет V -образную форму [9]. Начальные упругие и пластические деформации приняты равными нулю. Остаточные деформации и напряжения для этого распределения температуры, вычисленные при $E = 10^5$ МПа и коэффициенте расширения $\alpha = 0,56 \cdot 10^{-5}$ 1/°С, изображены на рис. 2 (кривые 1).

Для моделирования процесса локальной термической обработки сварного соединения в целях снижения уровня остаточных напряжений и оценки деформаций вновь решена задача исследования термомодеформационного состояния. Источник нагрева для локальной термической обработки может быть определен из решения обратной задачи при построении заданного распределения температуры, соответствующего выбранному режиму термической обработки, например, режиму местного отпуска.

В данном примере снижение уровня остаточных напряжений и изменение деформаций показано при воздействии источника, пятно нагрева которого имеет следующие размеры: 8 см — по оси y и 2 см — по оси x . Удельный тепловой поток равен $q = 0,55 \cdot 10^3$; скорость перемещения источника вдоль сварного шва $V = 0,2$ см/с. Остаточные упругие и пластические деформации, полученные при моделировании процесса сварки, введены в начальные условия задачи моделирования процесса локальной термической обработки.

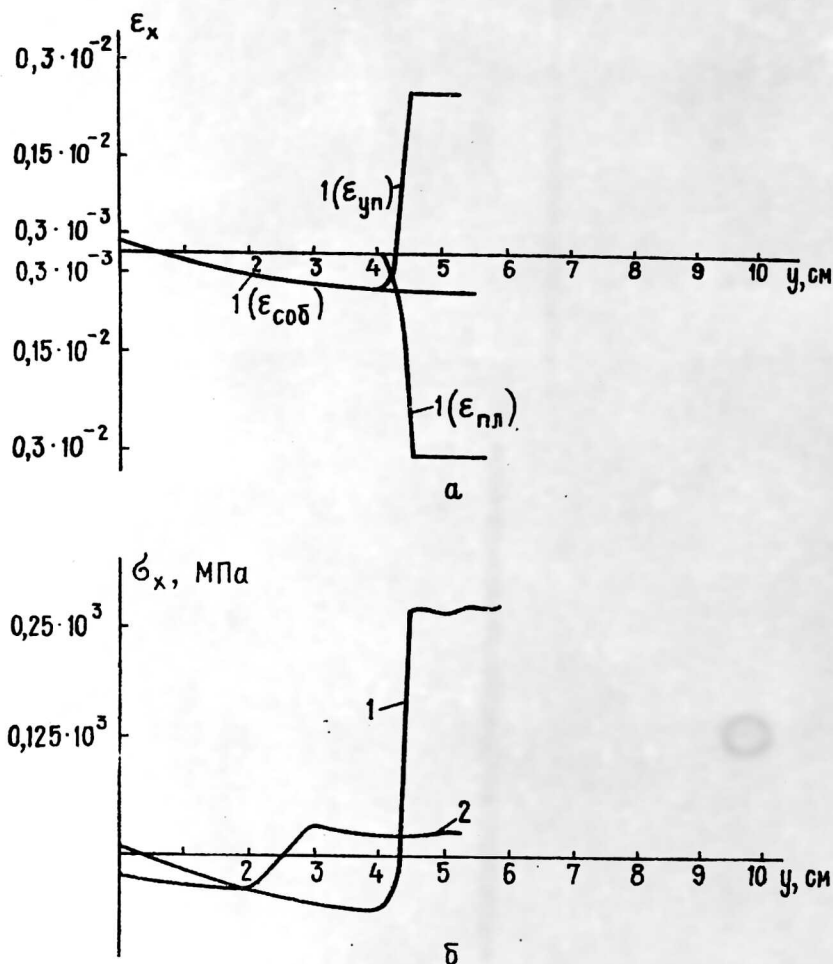


Рис. 2. Продольные остаточные деформации (а) и остаточные напряжения (б) в пластине: 1 — после сварки; 2 — после локальной термической обработки

Результаты расчета показывают, что остаточные продольные напряжения σ_x в сварном соединении пластины, полученные при сварке оптимальным И-образным источником, снизились практически до нуля (см. рис. 2, б, кривая 2).

Таким образом, рассмотрен алгоритм моделирования временных и остаточных деформаций и напряжений при воздействии на материал подвижного концентрированного источника энергии. Предложены две расчетные модели локальной термической обработки сварного изделия: с сопутствующим подогревом при сложном термическом цикле и после сварки при предварительном охлаждении сварного соединения до заданных температур. Показано снижение уровня остаточных деформаций и напряжений при локальной термической обработке, соответствующей отпуску сварного соединения после предварительного охлаждения.

Литература

1. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
2. Махненко В. И. Расчетные методы исследований кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наукова думка, 1976. — 319 с.
3. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. — М.: Машиностроение, 1984. — 279 с.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1988. — 288 с.

5. М е л ю к о в В. В. Моделирование оптимального теплового режима локальной обработки материалов концентрированными потоками энергии // Прикладная физика, 1996. № 1. С. 88—95.

6. В и н о к у р о в В. А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. — М.: Машиностроение, 1973. — 213 с.

7. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.

8. М е л ю к о в В. В. Оптимизация параметров термического цикла при обработке пластин подвижным источником энергии // Физико-химические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии // Сб. науч. тр. Ответств. ред. А. А. Углов. — М.: Наука, 1989. С. 185—193.

9. М е л ю к о в В. В. Влияние оптимального теплового режима сварки на остаточные деформации и напряжения сплава $Zr_{2,5}Nb$ // Сварочное производство, 1997 (в печати).

MODELING THERMODEFORMATIONAL CONDITION AT LOCAL INFLUENCE OF MOBILE ALLOCATED SOURCE

V. V. Melukov, A. F. Zaborjanski, B. A. Shishov, A. N. Semenov

Vjatka State Technical University, Kirov, Russia

For decrease for a level of residual deformations and internal strains, and for increase of quality a product at processing by the concentrated sources of energy the model of thermal process of processing of materials with an estimation thermodeformation condition is offered. At construction of model are used speed of moving of a source and it is specific capacity distribution. A sequence of research thermodeformation condition in the case of optimization of thermal process of processing is offered.