

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 519.6:536.24

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В СТЕНКЕ ТРУБЫ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТНЫХ СВАРОЧНЫХ РАБОТ

П.П. ПЁТУХ

Методом конечных элементов проведен численный расчет температурного поля в стенке трубы эксплуатируемого магистрального газопровода при проведении ремонтных сварочных работ. В результате расчетов установлено, что поток газа в трубе приводит к эффективному охлаждению внутренней стенки трубы и снижению ее температуры. Показаны возможность уточнения режимов сварки с целью обеспечения гарантированной прочности стенки трубы при выполнении сварочных работ под давлением.

Вычислительная мощность современных компьютеров позволяет решать широкий круг задач прикладной физики (в том числе расчет трехмерных температурных полей, напряжений, деформаций и других параметров в конструкциях различной геометрической формы и назначения). Математической моделью конструкций в общем случае является система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая процессы в сплошной среде с заданными краевыми условиями. Система уравнений, как правило, известна (уравнения Ламе для механики упругих сред; уравнения теплопроводности для термодинамики и т.д.), но точное решение удается получить лишь для частных случаев. В настоящее время широкое распространение получили приближенные модели на основе интегральных уравнений и модели на основе метода сеток. Применение метода сеток позволяет свести дифференциальную краевую задачу к решению системы алгебраических уравнений относительно неизвестных (узловых) значений функций. Наиболее часто для этого используется метод конечных элементов (МКЭ) [1, 2].

Метод конечных элементов в последнее время получил исключительно широкое распространение для решения задач теории упругости, термодинамики, гидро- и аэродинамики, магнетизма и других областей благодаря своей универсальности, ясной инженерной интерпретации и приспособленности для эффективного применения в компьютерах, и именно поэтому МКЭ стал стандартом для компьютерных инженерных расчетов (в том числе расчетов на прочность) в различных отраслях науки и техники. Математические модели технических объектов сводятся к системам однотипных алгебраических уравнений, содержащих десятки, а иногда и сотни тысяч неизвестных. Сущность МКЭ заключается в том, что любая непрерывная искомая величина аппроксимируется дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. В инженерном смысле применение этого метода предполагает представление расчетной схемы конструкции в виде совокупности отдельных подобластей с заданными свойствами, называемых конечными элементами (КЭ), которые связаны между собой в отдельных точках – узлах. В качестве неизвестных принимаются искомые величины (температуры, перемещения, усилия, и т.п.) в этих узлах. Для любой физической среды путем дискретизации можно построить аналог, аппроксимированный совокупностью КЭ различной формы. Процесс дискретизации области включает разбиение тела на КЭ – непересекающиеся подобласти – и нумерацию элементов и узлов. Разбиение области на КЭ сводится к заданию числа, размеров и формы непересекающихся областей [3 – 5].

Для решения сформированных систем уравнений необходимо задание начальных и граничных условий. Применительно к задачам теплофизики начальные и граничные условия для численного решения могут задаваться в виде температуры, теплового потока, действующего на тело, а также параметрами таких тепловых явлений, как свободная и вынужденная конвекция (теплоотдача), радиация.

Общее уравнение теплового баланса для вычисления температур МКЭ имеет следующий вид:

$$[K]\{T\} + [R]\{T + T_{abs}\}^4 = \{P\} + \{N\}, \quad (1)$$

где $[K]$ – матрица теплопроводности;

$[R]$ – матрица радиации;

$\{T\}$ – вектор неизвестных температур;

T_{abs} – температура для расчета радиации;

$\{P\}$ – вектор постоянных тепловых потоков;

$\{N\}$ – вектор температурно-зависимых тепловых потоков.

Для определения неизвестной матрицы (стационарного поля) установившихся температур конечно-элементная система использует итерационную схему Ньютона – Рафсона, которая приводит к следующей форме уравнения теплового баланса:

$$[K_r]^i \{\Delta T\}^i = \{R\}^i, \quad (2)$$

где $[K_r]^i \cong [K_r]^i + 4[R]^i \{T^i + T_{abs}\}^3 - \{\delta N / \delta T\}^i$;

$$\{R\}^i = \{P\}^i + \{N\}^i - [K]^i \{T\}^i - [R]^i \{T^i + T_{abs}\}^4.$$

При каждой итерации происходит вычисление $\{\Delta T\}^i = \{T^{i+1} - T^i\}$, пока не будет достигнута сходимость решения (определен вектор неизвестных температур).

Расчет температурного поля под сварочной ванной выполнялся МКЭ для трубы газопровода с наружным диаметром $D = 1220$ мм и толщиной стенки $s = 12,0$ мм. Сварочная ванна, расположенная на наружной поверхности трубы, принималась округлой полусферической формы с диаметром $d = 10$ мм и глубиной проплавления $h = 3,0$ мм. Температура сварочной ванны принималась $T_{пл} = 1800$ К, начальная температура металла $T_m = 280$ К, температура газа $T_r = 300$ К. Задавались следующие усредненные теплофизические свойства металла трубы (низколегированная сталь): коэффициент линейного расширения равен $11,4 \cdot 10^{-6}$ 1/К, коэффициент теплопроводности $k = 38$ Вт/м·К, удельная теплоемкость $c_p = 470$ Дж/кг·К, плотность $\rho = 7790$ кг/м³ [6; 7]. Конечно-элементная система позволяет вводить зависимость теплофизических свойств от температуры, однако использовалась упрощенная постановка задачи (теплофизические свойства не зависели от температуры).

Выполнен расчет МКЭ распределения температур для двух различных граничных условий на внутренней стенке трубы:

а) отсутствие теплоотдачи от внутренней стенки трубы потоку газа (газ в трубе находится при остаточном давлении $p_{ост} = 10 - 50$ мм вод. ст.);

б) наличие теплоотдачи от внутренней стенки трубы потоку газа (коэффициент теплоотдачи зависит от скорости и давления газа).

В случае наличия потока газа в трубе происходит конвективный теплообмен (вынужденная конвекция) между газом и металлом трубы, нагретым сваркой. На рис. 1 (для случая б) представлена компьютерная постановка задачи. Треугольники по контуру модели показывают начальную температуру металла трубы $T_m = 280$ К. Углубление круглой формы на поверхности – сварочная ванна с температурой плавления металла $T_{пл} = 1800$ К. Ромбы иллюстрируют процесс теплоотдачи (тепловой поток) от внутренней стенки трубы потоку газа, а рядом с ними числовое значение теплового потока.

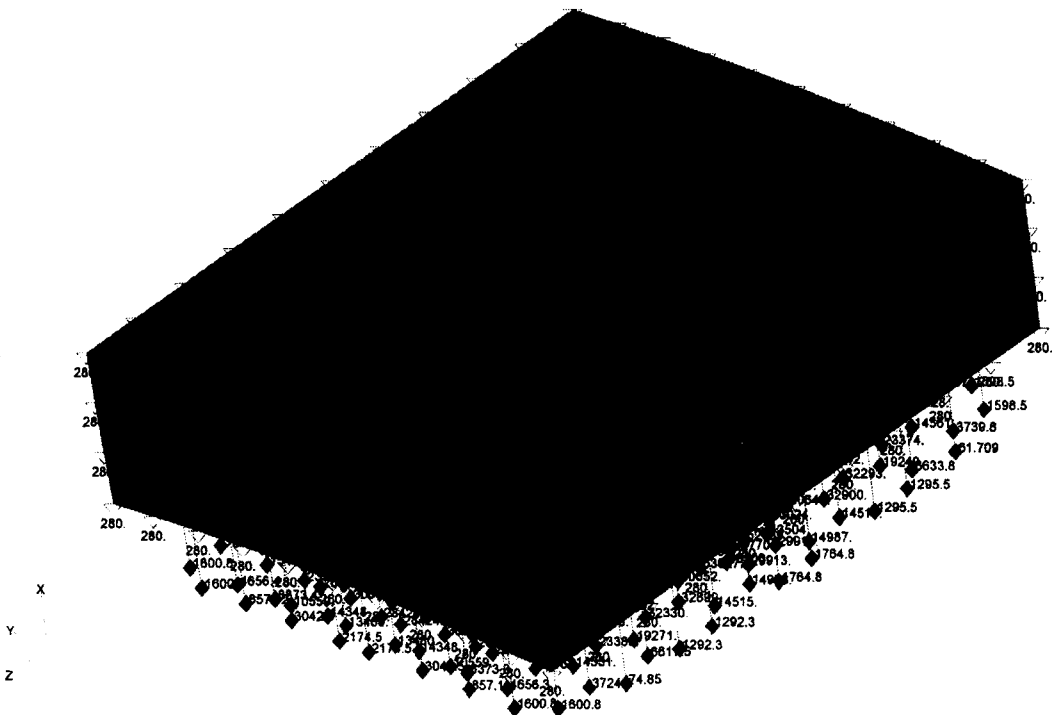


Рис. 1. Конечно-элементная модель фрагмента стенки трубы и сварочной ванны с начальными и граничными условиями

При численном расчете использовались значения коэффициента теплоотдачи от стенки трубы по потоку газа, полученные в ходе аналитического расчета для давления газа $p = 2,0$ МПа и скорости потока газа $v = 1; 3; 7$ м/с (соответственно $\alpha_1 = 58$ Вт/м²·К, $\alpha_2 = 139,8$ Вт/м²·К, $\alpha_3 = 273,2$ Вт/м²·К). На рис. 2 приведено трехмерное распределение температурного поля (для случая а). На рис. 3 представлено распределение температур (для случая б) с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_3 = 273,2$ Вт/м²·К. В табл. 1 содержатся числовые значения температур металла трубы под сварочной ванной.

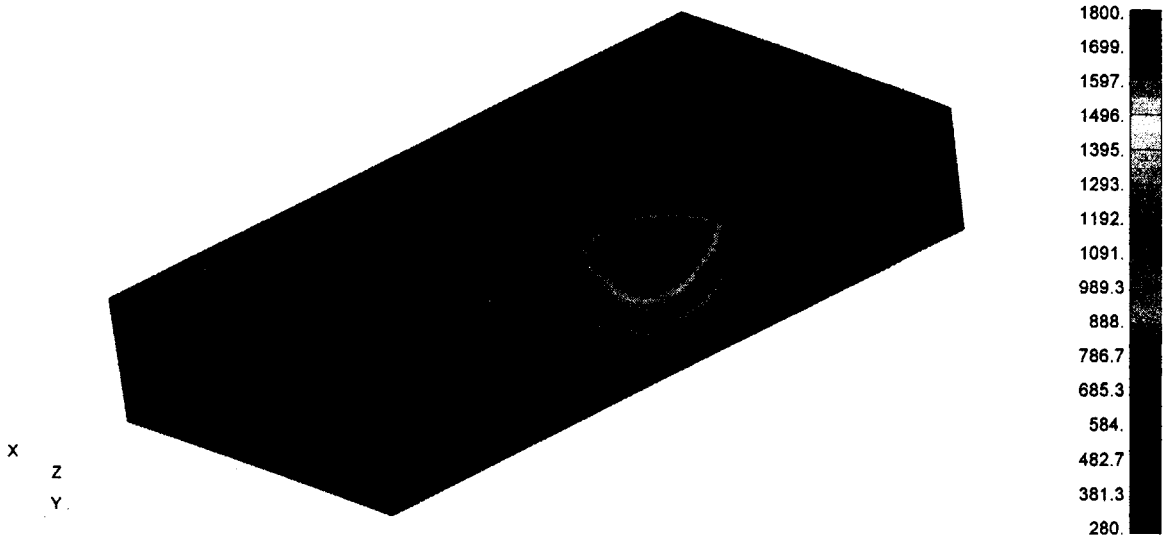


Рис. 2. Трехмерное температурное поле под сварочной ванной $d = 10$ мм глубиной 3 мм (без учета теплоотдачи от стенки трубы потоку газа). $T_{\max} = 990,4$ К (на внутренней стенке трубы под сварочной ванной)

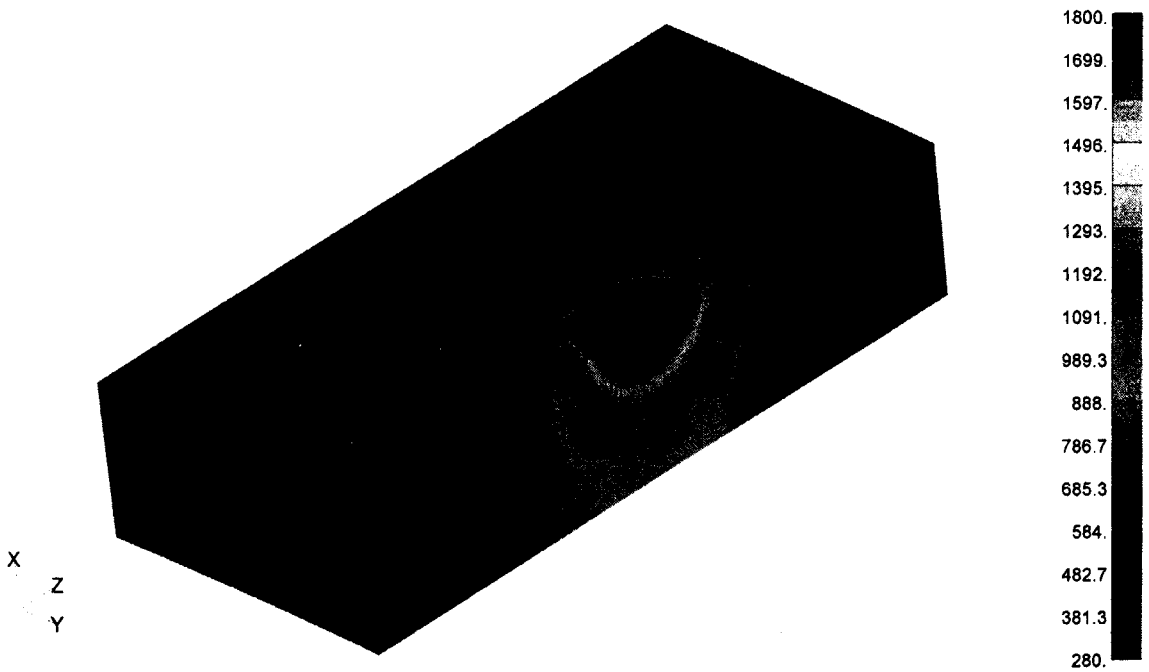


Рис. 3. Трехмерное распределение температурного поля под сварочной ванной $d = 10$ мм глубиной 3 мм (теплоотдача с коэффициентом $\alpha_3 = 273,2$ Вт/м²·К от внутренней стенки трубы потоку газа). $T_{\max} = 540,9$ К (на внутренней стенке трубы под сварочной ванной)

Таблица 1

Расстояние от внутренней стенки трубы, мм	Температура металла трубы под сварочной ванной, К			
	без теплоотдачи	с учетом теплоотдачи потоку газа		
		$\alpha_1 = 58 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$\alpha_2 = 139,8 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$\alpha_3 = 273,2 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$
9,0	1800,0	1800,0	1800,0	1800,0
8,2	1658,8	1648,1	1633,0	1609,0
7,4	1513,5	1491,7	1461,1	1412,2
6,5	1377,5	1344,8	1298,8	1225,4
5,7	1259,4	1216,2	1155,6	1058,7
5,1	1188,0	1137,7	1067,0	953,9
4,5	1130,1	1073,0	992,8	864,6
3,9	1085,7	1022,3	933,3	790,9
3,3	1054,1	984,9	887,6	732,1
2,5	1028,3	951,6	844,0	671,8
1,7	1016,2	932,8	815,5	628,0
0,8	1007,5	917,5	791,0	589,0
0,0	990,4	893,8	757,9	540,9

Для представления результатов расчетов температур в зоне сварочной ванны (рис. 2, рис. 3) использована 1/2 часть КЭ модели.

Трехмерное поле температур при сварке под давлением отличается по своей топографии и значениям от поля температур при сварке без давления газа. Анализ распределения температурного поля вдоль/поперек оси трубы показал, что сварочная ванна оказывает температурное воздействие на металл трубы, расположенный на расстоянии $\sim 2,8d$ от ее центра (при сварке при остаточном давлении газа в трубе) и на расстоянии $\sim 2,4d$ при внутреннем давлении газа в трубе. На рис. 4 приведено распределение температур металла на внутренней поверхности трубы. На рис. 5 – диаграмма результатов расчетов температур под сварочной ванной при различных граничных условиях.

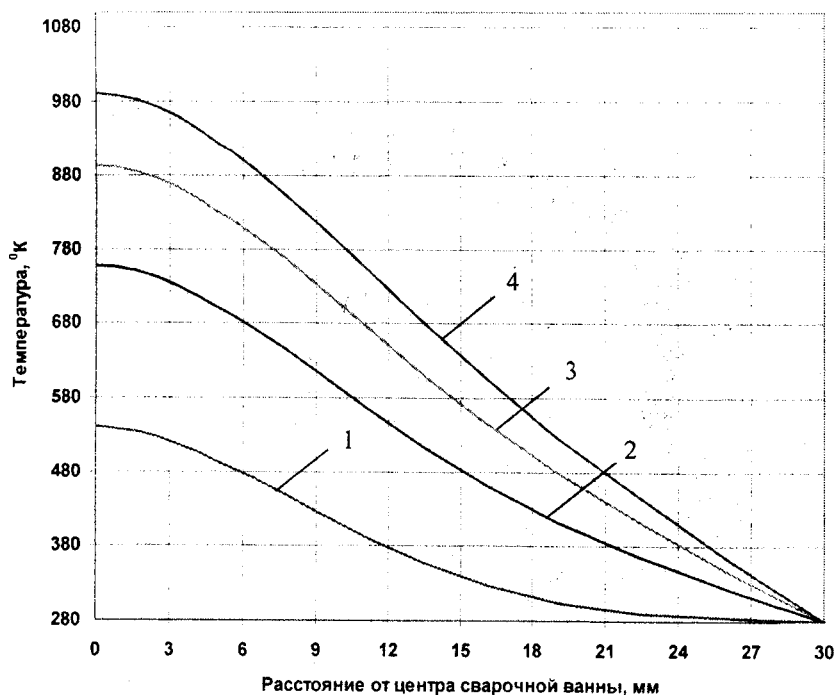


Рис. 4. Распределение температуры на внутренней поверхности трубы вблизи сварочной ванны: 1 – поток газа с $v = 7 \text{ м/с}$; 2 – поток газа с $v = 3 \text{ м/с}$; 3 – поток газа с $v = 1 \text{ м/с}$; 4 – без газа

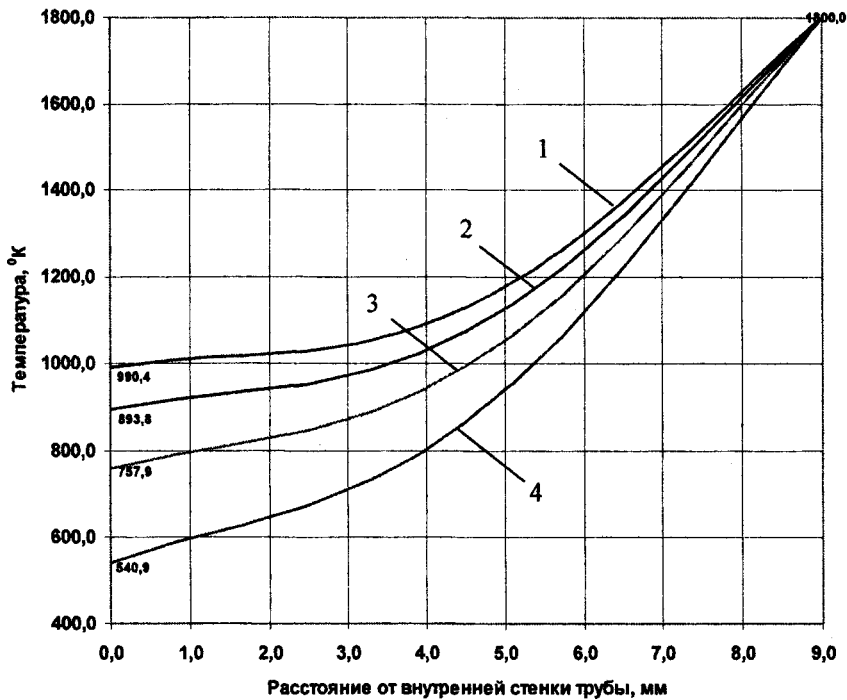


Рис. 5. Распределение температуры в стенке трубы под сварочной ванной при различных скоростях потока газа: 1 — без газа; 2 — поток газа с $v = 1$ м/с; 3 — поток газа с $v = 3$ м/с; 4 — поток газа с $v = 7$ м/с

Проанализирована возможность расчета температурного поля путем задания граничного условия на внутренней стенке трубы в виде параметров процесса вынужденной конвекции. При этом значение коэффициента теплоотдачи от стенки трубы потоку газа может вычисляться самой конечно-элементной системой. Установлено, что для задания такого граничного условия необходимы следующие данные: скорость и температура газа, диаметр трубы, свойства газа (теплопроводность, удельная теплоемкость, кинематическая вязкость, плотность). Числа Рейнольдса и Прандтля определяются автоматически, и по критериям подобия рассчитываются значение коэффициента теплоотдачи и соответствующее температурное поле в стенке трубы под сварочной ванной.

Выполнены расчеты МКЭ трехмерных температурных полей под сварочной ванной. В результате расчетов установлено, что поток газа в трубе приводит к эффективному охлаждению внутренней стенки трубы и снижению ее температуры. Данные численного расчета не противоречат аналитическим решениям.

Таким образом, задача расчета трехмерных температурных полей в стенке трубы при электродуговой сварке может решаться МКЭ для сортамента труб газопровода и произвольной скорости потока газа, что дает возможность индивидуального уточнения режимов сварки с целью обеспечения гарантированной прочности стенки трубы при выполнении сварочных работ под давлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
2. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. — М.: Мир, 1981. — 304 с.
3. Галлагер Р. Метод конечных элементов: Основы. — М.: Мир, 1984. — 428 с.
4. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. — М.: Стройиздат, 1982. — 442 с.
5. Применение математических методов и ЭВМ. Вычислительные методы проектирования оптимальных конструкций / А.Н. Останин, В.А. Гугля, Н.Н. Гурский и др. — Мн.: Выш. шк., 1989. — 279 с.
6. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
7. Ларионов Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Тепловые свойства металлов и сплавов. — Киев: Наукова думка, 1985. — 438 с.