

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Гареев И.С., Собко С.А., Филимоненко А.Г., Малых М.В.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И.Забабихина», Снежинск, Челябинская обл.  
[avva@ted.ch70.chel.su](mailto:avva@ted.ch70.chel.su)

Аннотация. В данной работе предложена расчетная модель для анализа тепловых процессов при сварке разнородных материалов, основанная на аналитической модели объемного тепловыделения двойного эллипсоида Голдака.

*Ключевые слова: тепловые процессы, моделирование, разнородные материалы, режимы сварки, геометрия сварного шва*

## THERMAL PROCESS SIMULATION ON OPTIMIZATION OF WELDING CONDITIONS FOR DISSIMILAR MATERIALS

Gareev I.S., Sobko S.A., Filimonenko A.G., Malykh M.V.  
FSUE RFNC-VNIITF named after Acad. E.I.Zababakhin, Snezhinsk, Chelyabinsk region

Abstract. The paper presents the computed model for the analysis of thermal processes when welding of dissimilar materials, based on the analytical model of volumetric heat release of double Goldak's ellipsoid.

*Key words: thermal processes, simulation, dissimilar materials, welding conditions, weld geometry*

Неправильно установленный режим нагрева и охлаждения изделия в условиях сварки может привести к появлению различных дефектов сварных соединений – трещин, непроваров, подрезов, а также к повышенным деформациям и напряжениям в сварном изделии [1]. Поэтому оптимизация режимов сварки с минимальным тепловложением и обеспечением качественного сварного соединения с заданными глубиной провара и шириной шва должна учитывать определение силы тока, напряжения на дуге, скорости сварки и других параметров источника нагрева, которые обеспечивают плавление заданного объема металла.

Расчетная твердотельная 3D-модель включала две втулки из 12Х18Н10Т и вал из тугоплавкого металла, рис. 1.

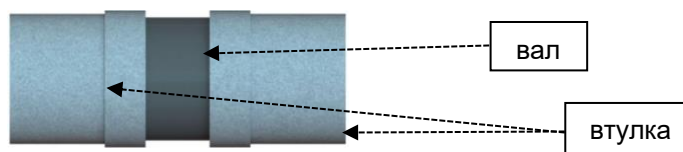


Рис. 1. Схема расчетной 3D-модели

На первом этапе была построена сетка конечных элементов: поверхностная – для назначения теплообмена между исследуемыми объектами и окружающей средой; объемная – для решения задачи теплопроводности. Применяемый метод разбиения – квадро-триангуляционный (рис. 2), максимальный размер элемента – 1 мм.

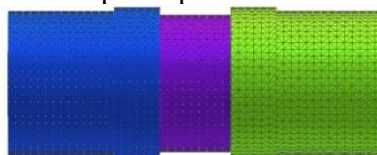


Рис. 2. Упорядоченная конечно-элементная модель

Для описания процесса нагрева при сварке применяли аналитическую модель объемного тепловыделения двойного эллипсоида Голдака (рис. 3), описываемую следующими уравнениями:

$$Q(x, y, z) = Q_f \exp\left(-\left(\frac{x_2}{a_f} + \frac{y_2}{b_2} + \frac{z_2}{d_2}\right)\right), \quad (1)$$

$$Q(x, y, z) = Q_r \exp\left(-\left(\frac{x_2}{a_r} + \frac{y_2}{b_2} + \frac{z_2}{d_2}\right)\right), \quad (2)$$

где  $Q_f, Q_r$  – объемное тепловыделение, Вт/мм<sup>3</sup>;  $a_f, a_r, b, d$  – геометрические характеристики модели сварочной ванны, мм. Мощность (дуги) определяли как тройной интеграл по объему фигуры:

$$P = \iiint_V Q \quad (3)$$

Применяемые значения геометрических характеристик сварочной ванны представлены в табл. 1.

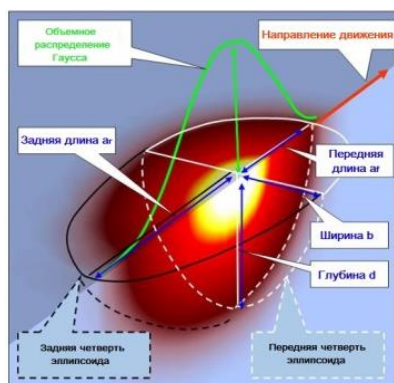


Табл. 1. Характеристики сварочной ванны

Параметр	Значение
$a_f$	3
$a_r$	7
$b$	2.5
$d$	1,6

Рис. 3. Модель Голдака

Значение начальной температуры исследуемых объектов принимали равным 20°C. При этом теплообмен между объектами и воздухом определяли следующими зависимостями:

- конвекция  $Q_c = -hA(T_1 - T_2)$ ;
- передача тепла через поверхность контакта  $Q_{снт} = \alpha A(T_1 - T_2)$ ;
- излучение (уравнение Стефана-Больцмана)  $Q_E = -\epsilon A(T_1^4 - T_2^4)$ .

Для проведения теплового расчета процесса сварки задавали следующие значения коэффициентов теплопередачи ( $h=7$  Вт/м<sup>2</sup>·К (тугоплавкий металл),  $h=30$  Вт/м<sup>2</sup>·К (12X18Н10Т), при  $\alpha=1000$  Вт/м<sup>2</sup>·К) и коэффициенте эмиссии  $\epsilon=0,6$  (из литературных данных [2, 3]).

Для описания модели распределения мощности источника энергии задавали следующие параметры сварки: ток сварки  $I=120$ А; напряжение  $U=9,5$ В; КПД процесса сварки  $\eta=0,75$ ; скорость сварки  $v=250$ мм/мин. Тепловые свойства материалов задавали с учетом справочных данных [4].

Траекторию движения источника сварки ориентировали перпендикулярно оси свариваемых деталей. В начале процесса временной интервал нарастания тока сварки задавали 5 с. Для ориентации модели в пространстве к узлам кромок свободных торцов втулок прилагали ограничение перемещения по всем осям.

В результате проведенного расчетного моделирования получено распределение температурных полей и изменение температуры по толщине свариваемых деталей, рис.4 и 5.

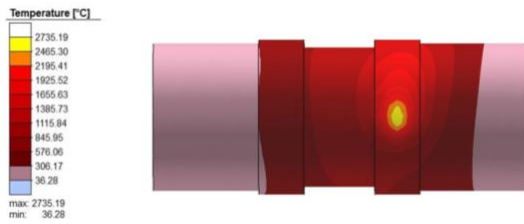


Рис. 4. Распределение температурного поля в момент времени нагрева 20 секунд

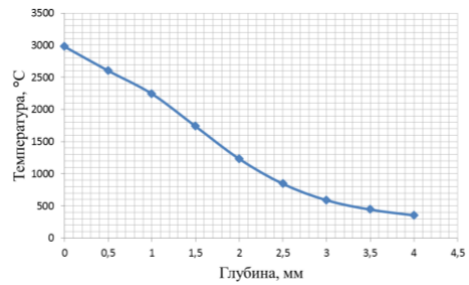


Рис. 5. График изменения температуры по толщине в момент времени 5 секунд

Для определения значений температуры в условных точках на модели были выбраны 3 точки табл. 2, в которых с интервалом времени в одну секунду фиксировали изменение температуры.

Табл. 2. Координаты расчетных точек

№ точки	Объект модели	Координата x, мм	Угол (по направлению сварки)
1	Втулка	8	29,8°
2	Втулка	12	336,0°
3	Вал	-6	198,6°

Для проверки соответствия расчетной модели тепловому процессу была выполнена сварка образцов из разнородных материалов. Температуру определяли с применением термопреобразователей, установленных в 3 обозначенных (расчетных) точках.

При обработке полученных данных (рис. 6 и 7) установлено, что для точек 1 и 2 отклонения расчетных и экспериментальных значений по температуре удовлетворительно согласуются и составляют 25,47% и 24,6%, для точки 3 – 8,12%, что подтверждает адекватность расчетной модели.

На основе расчетов (по рис.5) при температуре плавления 12Х18Н10Т  $T=1430\text{ }^{\circ}\text{C}$  глубина провара составила  $d=1,75\text{ мм}$  при экспериментальном значении  $d=1,6\text{ мм}$  (табл. 1).

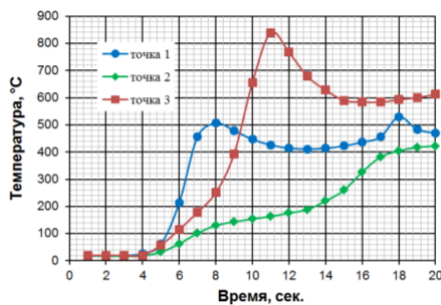


Рис. 6. График зависимости расчетной температуры в условных точках

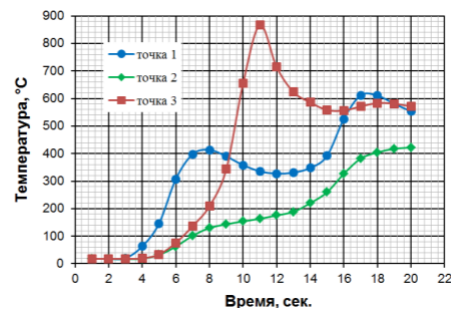


Рис. 7. График зависимости экспериментальной температуры в условных точках

Разработанная модель позволяет определить и минимизировать температуру в любой момент времени и в любой точке детали, в том числе по толщине, при обеспечении требуемой глубины провара.

*Использованные источники:*

1. Теория сварочных процессов (с основами физической химии): ПЗ0 Учебник для вузов / Г.Л. Петров, А.С. Гумарев. Изд. 2-е, перераб. – М.: Высш. школа, 1977. – 120 с.
2. Цветков, Ф.Ф. Задачник по тепломассообмену / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 195 с.
3. Цаплин, А.И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии / А.И. Цаплин, И.А. Никулин. – Пермь: Пермский Государственный Технический Университет, 2011. – 296 с.
4. Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В.Е. Зиновьев. – М.: Изд-во Металлургия, 1989. – 383 с.