

УДК 621.791

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СВАРКИ

А.И. Трофимов,
М.А. Трофимов,
Д.А. Егоров, М.Г. Талабанов

Обнинский институт атомной
энергетики НИЯУ МИФИ

Математическое описание процессов, возникающих в металле при сварке, позволит заранее предсказать результат и, соответственно, заранее выбрать оптимальный способ сварки для получения сварного соединения максимальной прочности. В статье рассмотрены способы получения математического описания и программные пакеты, реализующие его.

Ключевые слова: сварка, математическая модель, оптимизация процесса сварки, качество шва.

Современная промышленность немыслима без применения сварки, которая необходима как при производстве крупногабаритных изделий, например труб большого диаметра для газопроводов, так и миниатюрных деталей самого разного назначения, изготовленных из различных металлов и композитных материалов. Между тем происходящие при сварке физико-химические процессы весьма сложны и без их изучения, в том числе моделирования, невозможно достичь новых высот в этой технологической отрасли.

Процесс сварки происходит в три стадии. Трехстадийность процесса сварки связана с тем, что ее можно отнести к классу так называемых топохимических реакций. Последние на микроучастках отличаются двухстадийностью процесса образования прочных связей между атомами соединяемых веществ (рис. 1). В макрообъемах процесс сварки завершается третьей стадией – диффузией.

На первой стадии А развивается физический контакт, т.е. осуществляется сближение соединяемых веществ на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия, а также происходит подготовка поверх-

MATHEMATICAL MODELING OF THE FORMATION MECHANISM OF WELDED JOINTS TO ENHANCE THEIR STRENGTH

A.I. Trofimov, M.A. Trofimov,
D.A. Egorov, M.G. Talabanov

Mathematical description of the processes occurring in the metal during welding enables to predict the result and, accordingly, select the optimal pre-welding method for obtaining the maximum weld strength. The paper considers ways of obtaining the mathematical description and the software packages that implement it.

KEYWORDS: welding, mathematical model, optimization of the welding process, the quality of the weld.

ностей к взаимодействию. На второй стадии Б – стадии химического взаимодействия – заканчивается процесс образования прочного соединения на микроучастке.

Диффузионные процессы развиваются почти одновременно с прорастанием дислокаций при пластической деформации контактирующих поверхностей либо при наличии высокой температуры. Для качественного соединения изделий необходимо обеспечить контакт по большей части стыкуемых поверхностей и активацию их.

Активация поверхностей состоит в том, что поверхностным атомам твердого тела сообщается некоторая энергия, необходимая для обрыва связей между атомами тела и атомами внешней среды, насыщающими их свободные связи; для повышения энергии поверхностных атомов до уровня энергетического барьера схватывания, т.е. для перевода их в активное состояние.

Модернизация современной технологии сварочного производства с целью выпуска более эффективных, менее материалоемких и более надежных сварных конструкций связана с применением новых

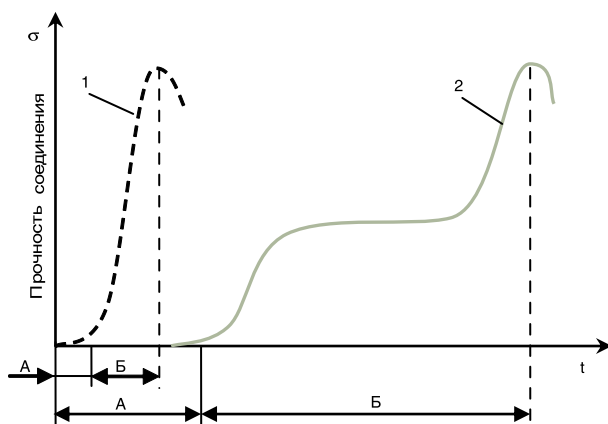


Рис. 1.

Кинетика изменения прочности соединения σ при быстром (1) и медленном (2) развитии физического контакта (А) и химического взаимодействия (Б) в зависимости от длительности сварки t

высокопрочных материалов, концентрированных источников энергии, гибких производственных систем и возрастанием требований к формированию шва и качеству сварных соединений. При этом технолог-сварщик должен многократно решать основную технологическую задачу – по заданным свойствам соединения и геометрическому положению шва выбрать оптимальный способ сварки и его режимы, причем критериями оптимизации являются формирование шва, свариваемость металла и стабильность качества при наличии физических и технико-экономических ограничений.

Сложная проблема оптимизации технологических процессов сварки может быть решена тремя путями: эмпирическим, теоретическим и их комбинацией. Сокращение сроков проектирования и освоение новых видов продукции тяжелой промышленности обусловили необходимость отказа от эмпирического метода «проб и ошибок» и изыскания эффективных методов рационализации исследований и проектирования технологии сварки.

Большую экономию дает рациональное планирование натурального эксперимента, проведение которого является единственной возможностью исследования при плохой изученности явлений, протекающих в технологическом процессе сварки. Если природа явлений процесса известна, его можно изучить путем моделирования, как физического, так и математического. Важным преимуществом математического моделирования технологических процессов на основе фундаментальных физико-химических законов природы является универсальность результатов такого исследования и возможность их использования в самом широком диапазоне параметров процесса.

Разработка математической модели сварочных

процессов очень трудоемка и требует высокой квалификации. Тем не менее, эта работа экономически целесообразна, так как такая модель создается один раз, а затем может только уточняться по мере выявления новых физических явлений при данном способе сварки.

Анализ задачи на качественном уровне наряду с грубыми количественными оценками позволяет обоснованно упростить математическую модель процесса и конкретизировать цели моделирования, что существенно упрощает дальнейшее исследование. Рекомендуется следующая последовательность феноменологического анализа:

- 1) проанализировать технико-экономические мотивы постановки задачи;
- 2) установить количественные критерии достижения цели;
- 3) установить и проанализировать причинно-следственные взаимосвязи между основными физико-химическими явлениями и построить структурную модель процесса;
- 4) провести анализ значимости явлений;
- 5) конкретизировать цели моделирования.

Иногда не удастся установить теоретическую причинно-следственную связь между отдельными параметрами. В этих случаях используют эмпирические зависимости.

Основными физическими процессами при сварке являются тепловые, диффузионные, деформационные, электрические и газогидродинамические явления. Большинство из них может быть описано в рамках аппарата математической физики дифференциальными уравнениями гиперболического, параболического и эллиптического типа. Математическая формулировка задачи включает выбор параметров, характеризующих физический процесс, нахождения соответствующего дифференциального уравнения и описание краевых условий.

Необходимо понимать, что дифференциальные уравнения отражают только механизмы явлений и полностью абстрагированы от условий протекания моделируемого процесса. Для решения конкретных задач такие уравнения необходимо дополнить так называемыми условиями однозначности, определяющими физические свойства рассматриваемого объекта и окружающей его среды, геометрические размеры зоны моделирования, условия взаимодействия граничных поверхностей объекта с окружающей средой, а также начальное состояние системы объекта – окружающая среда. Совместное решение дифференциальных уравнений с уравнениями однозначности обеспечивает единственность решения для каждого конкретного процесса [2].

Эксперименты на металлических образцах остаются необходимыми для определения свойств материала, проверки модели, ее корректировки для решения новых задач, но за счет применения компьютерного

моделирования они резко сокращаются по объему и сложности.

В мире существуют десятки коммерческих программных комплексов (наиболее известны NASTRAN, ANSYS), в том числе специализированных для решения сварочных и других технологических задач (SYSWELD, MARC).

Качество и быстрота компьютерного расчета во многом определяются выбором программы. Особое внимание стоит уделить SYSWELD, поскольку этот уникальный программный продукт специально предназначен для моделирования процессов сварки различных типов.

Программа SYSWELD была разработана в 1970-х годах в Министерстве атомной промышленности Франции, а затем передана для коммерциализации французской фирме FRAMASOFT S.A., подразделению компании FRAMATOME, которая является известным разработчиком технологий, применяемых в атомной энергетике.

SYSWELD содержит несколько модулей:

- Welding Wizard – моделирует все физические процессы, происходящие во время сварки;
- Heat Treatment – моделирует все физические процессы, происходящие во время термообработки;
- Sysweld Assembly – модуль сборки, используемый для моделирования сборки и сварки больших конструкций. Он оперирует переданными из предыдущих модулей величинами (поля напряжений и деформаций) для создания единого НДС всей конструкции.

Программное обеспечение позволяет проводить моделирование вручную, по предложенному программой шаблону или автоматически. Результаты могут быть представлены в виде графиков, диаграмм, числовых значений. Программа позволяет:

- оценить остаточную деформацию;
- минимизировать остаточные напряжения;
- учесть влияние геометрии материала;
- оптимизировать процесс сварки;
- оценить фазовые превращения;
- анализировать влияние активного источника тепла.

Источник теплоты моделируется в зависимости от значения объемной плотности энергии Q_v ($\text{Вт}/\text{мм}^3$) приложенной к элементам, расположенным на траектории перемещения источника.

Разработчики SYSWELD предлагают пользователю три предварительно созданные формы источников теплоты:

- Double ellipsoid (двойной эллипсоид);
- 3D conical Gaussian (конический источник);
- 2D Gaussian (поверхностный источник).

Объемный источник теплоты, заданный двойным эллипсоидом предназначен для моделирования сва-

А.И. ТРОФИМОВ, М.А. ТРОФИМОВ,
А.А. ЕГОРОВ, М.Г. ТАЛАБАНОВ
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА
ОБРАЗОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СВАРКИ

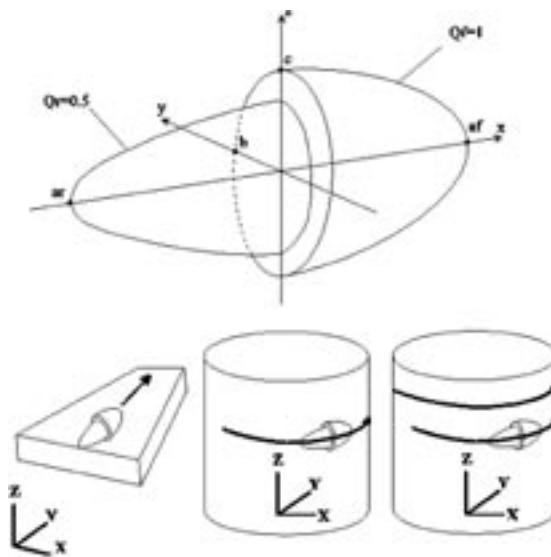
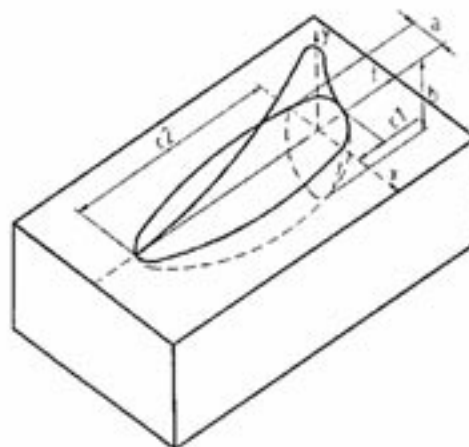


Рис. 2.

Форма и возможности перемещения источника



$$Q(x, y, z) = Q_f \exp \left(- \left(\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right)$$

$$Q(x, y, z) = Q_r \exp \left(- \left(\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right)$$

Рис. 3.

Геометрические параметры моделируемого источника теплоты

рочных процессов с присадочным материалом: MIG, TIG сварка, сварка под слоем флюса.

На рис. 2, представлена форма и возможности перемещения данного источника.

Согласно рис. 2 возможно моделировать поступательное, вращательное и спиральное перемещение источника.

На рис. 3 представлены основные параметры источника, где задаются размеры источника тепла и Q_0 -объемная плотность энергии.

Конический источник предназначен для моделирования сварочных процессов с большой энергией: лазер, электронный луч. Моделируемые способы перемещения данного источника, также, как и последующего, такие же, как и при объемном источнике теплоты, заданный двойным эллипсоидом.

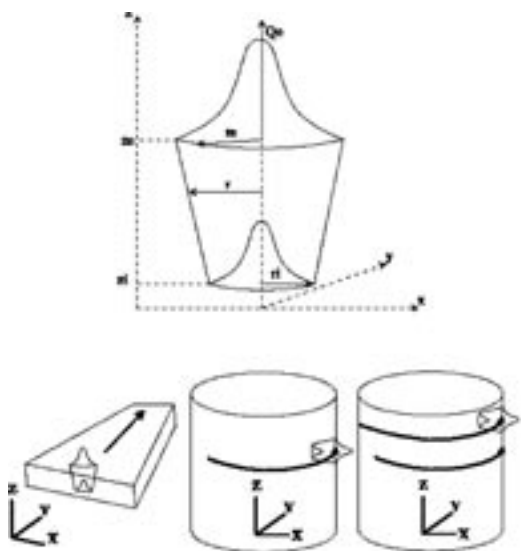
На рис. 4 представлена геометрическая форма и параметры конического источника теплоты.

Gaussian поверхностный источник теплоты особенно подходит для моделирования процесса поверхностного воздействия, например, лазерного упрочнения. Описание источника представлено на рис. 5.

Используя язык программирования FORTRAN, пользователь может создать любой, необходимый ему источник теплоты [1].

Результатами применения программ моделирования процессов в сварных соединениях являются:

- сокращение стоимости производства;
- оптимизация производства изделия;
- максимальная безопасность изделия на ранней стадии проектирования;
- выявление всех факторов, ведущих к изменению формы, размеров и свойств изделия.



$$Q(x, y, z) = Q_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right)$$

$$r_0(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e}(z - z_e)$$

Рис. 4.

Геометрическая форма и параметры конического источника теплоты

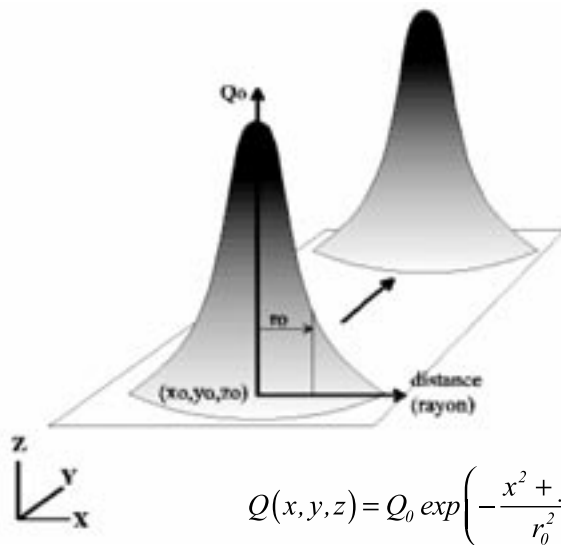


Рис. 5.

Описание поверхностного источника теплоты

ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование сварочных процессов. Инструкция по эксплуатации. ESI Group 2007 г.
2. Судник В.А., Ерофеев В.А. Математическое моделирование технологических процессов сварки в машиностроении // Учеб. Пособие для слушателей заочных курсов повышения квалификации ИТР по технологии и оборудованию сварочного производства. М.: Машиностроение, 1987. 56 с.

Адольф Иванович Трофимов,

д.т.н., профессор Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ, зав. кафедрой автоматики, контроля и диагностики

Максим Адольфович Трофимов,

д.т.н., профессор Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ

Дмитрий Александрович Егоров,

аспирант Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ

Максим Геннадиевич Талабанов,

аспирант Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ

☎ 249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1,
e-mail: trofimovma@mail.ru