

21. Sanders N. Studies of the anode region of a high – intensity argon arc / Sanders N., Etemadi K, Hsuk Satal. - J.Appl.Phys, v.53, N6, 1982.- 4136-4141p.

22. Jainakov A. Study of electric arc plasma flow in transition region from laminar to turbulent current. Plasma jets in the development of new materials technology / Jainakov A., Usenkanov J.O., Jumaliev T. P.- Frunze: 1990.

УДК 537.527

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ СВАРКИ

Жайнаков Аманбек Жайнакович, д.ф.-м.наук, академик, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: jainakov47@mail.ru

Султангазиева Рена Турдубековна, к.ф.-м.н., доцент, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: renasultangazieva@mail.ru

Медралиева Бюбюсара Ниясбековна, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: medralieva@mail.ru

В работе оценены возможности применения программного комплекса OpenFoam для решения задач электродуговой и плазменной сварки. Обоснована необходимость сквозного процесса моделирования, включающей задачи моделирования дуги, сварочной ванны, сварочного шва, металлургических процессов и вытекающие из них термомеханические задач. Представлены особенности решения полной системы МГД уравнений, описывающий процесс электродуговой сварки в программном пакете OpenFoam.

Ключевые слова: МГД уравнения, электродуговая сварка, сварочная ванна, компьютерное моделирование, программный пакет OpenFoam

THE MODERN TOOLS FOR COMPUTER MODELING OF PLASMA ARC WELDING

Jainakov Amanbek Jainakovich, Academician, d.p.m.s., professor, KSTU named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, c. Bishkek, pros. Mira-66, e-mail: jainakov-41@mail.ru

Sultangazieva Rena, phd, docent, Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, Kyrgyzstan, 720044, c. Bishkek, pros. Mira-66, e-mail: renasultangazieva@mail.ru

Medralieva Bubusara, Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, Kyrgyzstan, 720044, c. Bishkek, pros. Mira-66, e-mail: medralieva@mail.ru

In this paper the possibility of application of OpenFoam software package for solving electric and plasma arc welding tasks are evaluated. It is shown that the arc modeling tasks, the weld pool, weld, metallurgical processes and the resulting thermo-mechanical problems must be solved together. Features of the MHD equations solution for arc welding complex system by the OpenFoam software package are described.

Keywords: MHD equations, arc welding, weld pool, computer modeling software package OpenFoam.

Электродуговая и плазменная сварка являются одними из самых часто применяемых видов соединений для металлических деталей, изделий и конструкций. Широкое применение автоматическая аргодуговая сварка неплавящимся электродом получила в авиационном двигателестроении для сварки узлов и агрегатов турбореактивных двигателей из

тонколистовых коррозионно-стойких материалов. Среди распространенных электродуговых способов обработки металлов широкое применение находят технологии, основанные на использовании сжатой дуги, получившие название «плазменно-дуговая обработка». Сварка сжатой дугой как одно из применений плазменно-дуговой обработки имеет много общего с аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом, но является более совершенным способом получения сварных соединений. Плазменная сварка и резка нашли применение в производстве автомобилей, авиационной промышленности, судостроении, на химических предприятиях и в других отраслях производства. В авиационном двигателестроении преобладают стыковые сварные соединения, которые в основном выполняют на медной подкладке. Большое распространение технология плазменной сварки получила в нефтехимической промышленности и при производстве трубопроводного оборудования. Применение способа сварки проникающей дугой обеспечивает высокую производительность и качество при изготовлении емкостей, реакторов, теплообменников и других изделий из низко и высоколегированных сталей, а также алюминия. Основными требованиями, предъявляемыми к сварным конструкциям, являются высокое качество сварного шва и постоянство его геометрических размеров.

Процессы при сварке отличаются рядом особенностей, влияющих как на ход их развития, так и на получаемые результаты: малый объем сварочной ванны, высокие скорости протекания процессов, большое количество реагирующих фаз в ванне, высокие температурные градиенты и перегрев расплава в ванне, движение жидкого металла, интенсивное перемешивание расплавленных продуктов и их непрерывный обмен в сварочной ванне, высокие скорости охлаждения и кристаллизации наплавленного металла, активное взаимодействие расплавленного металла с окружающей газовой средой, нагретой до высоких температур

Распределение тепла при сварке влияет на форму сварного шва, размеры зоны термического влияния, временные и остаточные деформации и напряжения, время пребывания металла в критическом диапазоне температур, когда происходят структурные превращения. При неравномерном температурном поле в сварном соединении возникают сжимающие и растягивающие термические внутренние напряжения. Величина этих напряжений зависит главным образом от температуры нагрева, коэффициента линейного расширения и теплопроводности свариваемого металла. Временные напряжения наблюдаются только в процессе сварки при изменении температуры и, как правило, исчезают после охлаждения изделия. Остаточные напряжения остаются в сварной конструкции после окончания сварки, ее полного остывания и снятия закрепляющих нагрузок. Высокие скорости охлаждения и кристаллизации металла существенно отражаются на строении получаемых швов, приводят к мелкозернистой структуре их, уменьшению химической неоднородности.

При выборе параметров сварки необходимо исходить из анализа прохождения всего комплекса физико-химических процессов для получения металла шва с определенными свойствами и определенного химического состава и удовлетворяющий требованиям к эксплуатационным характеристикам сварного шва. Это определяется не только составом присадочного и основного металла, но также и от характера и интенсивности реакций, протекающих в процессе сварки. Трещины, поры и твердые включения учитывают реакции между газами и свариваемым металлом, явления кристаллизации, твердофазные превращения и остаточные напряжения.

Возможные дефекты сварного шва, так или иначе, связаны с теплофизическими, гидродинамическими, электромагнитными и металлургическими процессами, протекающими при сварке. Один из дефектов - несплавление, его образование тесно связано с динамикой формирования сварочной ванны, которое разделяется на две стадии — образование канавки в основном металле и последующее заполнение ее металлом сварочной ванны. Если пленка расплавленного металла успела затвердеть к моменту ее заполнения жидким металлом, а запас теплоты, накопленный в сварочной ванне, недостаточен для

повторного расплавления основного металла, смачивание металлом сварочной ванны основного металла не происходит и образуется зона несплавления [4].

Следствием излишне высокого напряжения дуги являются подрезы, местное уменьшение толщины основного металла у границы шва, которое приводит к резкой концентрации напряжений в некоторых случаях и существенно снижает прочность сварного соединения. Форма подреза линии сплавления определяется двумя факторами – равновесия распределенных сил в сварочной ванне и гидродинамики ванны, а также от термических условий кристаллизации.

При избыточной силе тока могут образоваться прожоги - полости в шве, образовавшиеся в результате вытекания сварочной ванны, которое является следствием потери устойчивости нижней поверхности сварочной ванны.

Для расчетного прогноза образования прожогов учитывается температурная зависимость коэффициента теплопроводности и деформация поверхности сварочной ванны [7].

Прогнозирование качества формирования шва на базе вычислительного эксперимента, основанного на создании математической модели, описывающей более полно все физические процессы при сварке. В работе [13]

предлагается сквозной процесс моделирования, включающий следующие этапы:

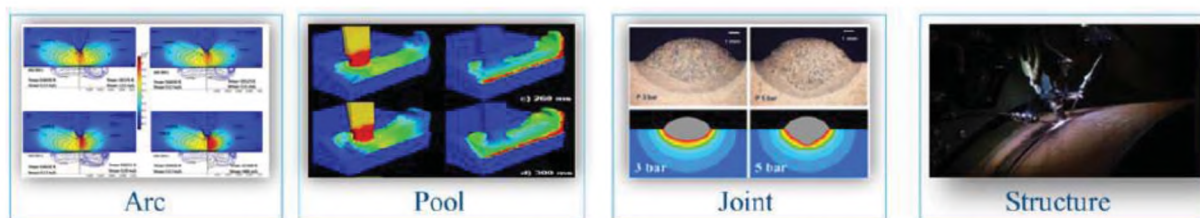


Рис. 1 Метод сквозного моделирования электродуговой сварки

1) Моделирование дуги. Решение МГД уравнений электрической дуги с учетом давления и свойств защитных газов позволит обеспечить постановку более точных граничных условий для сварочной ванны.

2) Моделирование сварочной ванны для получения картины тепло и массообмена внутри сварочной ванны с учетом взаимодействия с потоками плазменной дуги, взаимодействия расплавленного и основного металла. Решение данной задачи даст ценную информацию для дальнейшего термомеханического моделирования

3) Моделирование свойств сварного шва, рассматривающий диффузионные процессы, фазовые превращения, остаточные напряжения, который даст возможность провести анализ структурных характеристик.

4) Анализ структурных явлений. Решение подобной сквозной задачи с учетом протекающих металлургических процессов даст возможность провести анализ появления определенных дефектов, и в дальнейшем, управлять технологическим параметрами сварки для получения качественного сварного шва. Моделирование процессов сварки позволит установить взаимосвязь между режимами сварки и показателями качества сварных соединений. На основании этого могут быть выработаны технологические требования, как к самому процессу сварки, так и необходимому для его реализации сварочному оборудованию.

Методы математического моделирования сварочных процессов получили интенсивное развитие после появления первых работ по расчету температурных полей, создаваемых в телах различной формы и размеров, создаваемых движущимися концентрированными и распределенными источниками тепла. В дальнейшем теория тепловых процессов при сварке была Н.Н. Рыкалиным [6] значительно расширена, усовершенствованна и доведена до широкого практического применения в большом количестве прикладных исследований. Большой вклад в развитие плазменных технологий и методов математического моделирования электрической дуги внесли ученые Кыргызстана, возглавляемые академиками Жеенбаевым Ж.Ж., Энгельштом В.С., Жайнаковым А. Были

развиты двумерные математические модели электродуговой плазмы как в приближении локального термодинамического равновесия [9], так и с учетом отклонения плазмы от термического и ионизационного равновесия [5]. Проведены численные исследования открытых электрических дуг и плазмотронов [3]. Проведены расчеты, учитывающие взаимное влияние столба электрической дуги с расплавленным металлом обрабатываемого изделия [2]. В рамках трехмерной математической модели рассмотрена электрическая дуга, горящая во внешних газодинамических и магнитных полях [11].

В области моделирования сварочной ванны, описании физических процессов, происходящих в расплавленном металле под действием электрической дуги, значительный вклад внесли работы М. Tanaka [12], Tradia A. [8].

Одними из эффективных методов решения подобной многоплановой задачи являются методы компьютерного инженерного анализа, использующие ранее накопленные теоретические и эмпирические знания, в форме модели, связывающей параметры технологии сварки с качеством сварных соединений.

Для решения практических задач вычислительной гидроаэродинамики часто используются коммерческие пакеты прикладных программ. К числу таких пакетов относят ANSYS CFX.

При моделировании дуговой электрической сварки пакет ANSYS позволяет учитывать следующие явления:

- многофазность потока — жидкость и газ контактируют с образованием свободной поверхности раздела.

- многокомпонентность металла свариваемого изделия

- взаимодействие металла с защитным газом и окружающей средой

- поверхностные эффекты на катоде и на аноде

- фазовые переходы (плавление, затвердевание, испарение металла)

- излучение

- электромагнетизм

- физико-химические процессы в дуге, столб дуги рассматривается как область локального термодинамического равновесия с соответствующими параметрами высокотемпературного газа. Расчетная модель может учитывать все основные процессы в прикатодных и прианодных областях, включая термоэмиссию, ионизацию и рекомбинацию.

В работе [10] проведено численное моделирование процесса взаимодействия сжатой и свободно горящей электрической дуги с технологическим объектом с использованием пакета прикладных программ ANSYS CFX. Модель основывается на расчёте уравнений баланса энергии, неразрывности, движения и системы уравнений Максвелла. Дуга горит в среде аргона. Сетка создана при помощи продукта ICEM CFD, входящего в пакет ANSYS. Инструментарий пакета позволяет вывести результаты численного моделирования в удобном для анализа графическом виде.

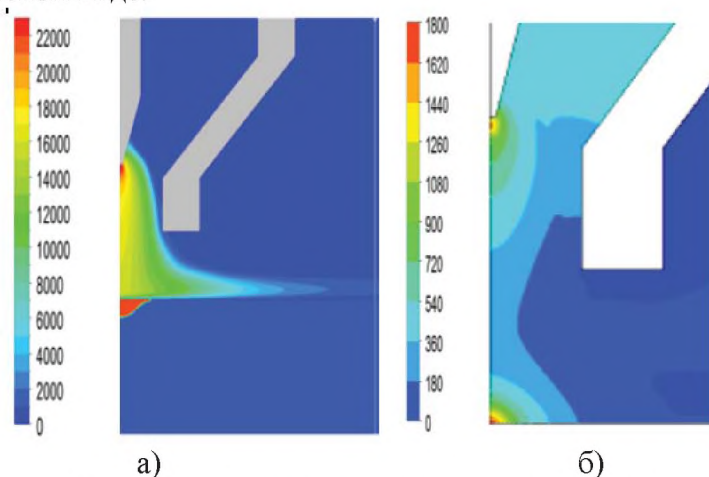


Рис.2 Поле температур (а) и поле давлений

Проведенные экспериментальные исследования по спектроскопической диагностике и производства макрошлифов обрабатываемого изделия позволили авторам прийти к выводу, что компьютерная модель дуги и сварочной ванны, выполненные в пакете ANSYS адекватно отражает реальный процесс сварки.

Несмотря на эти достоинства, коммерческие прикладные пакеты имеют серьезные недостатки. Одним из них является высокая стоимость лицензий на использование, а также последующую поддержку. В некоторых случаях, решение реальных задач требуют больших вычислительных мощностей, что приводит к необходимости распараллеливания вычислительных процессов. Еще одним недостатком представляется закрытость исходного кода. Это сужает возможности для более детального изучения реализованных в пакете математических моделей и алгоритмов, а также их модификации и усовершенствования для конкретного случая.

Широкие возможности по решению задач вычислительной гидродинамики предоставляет свободно распространяемый пакет - OpenFOAM CFD. В целом, OpenFOAM предназначен для решения следующих основных классов задач: Гидродинамика ньютоновских и не-Ньютоновских вязких жидкостей с учетом конвективного теплообмена и действием сил гравитации. Моделирование течений многофазной жидкой и газообразной среды, процессов горения. Моделирование теплопереноса. Прочностные расчеты, задачи, связанные с деформацией расчетной сетки, сопряженные задачи. Система позволяет моделировать сложные технические процессы и содержит в себе большой спектр численных методов.

Задача совместного рассмотрения области электродуговой плазмы и обрабатываемого изделия решается на программном пакете OpenFoam. Физические процессы в столбе электродугового разряда и взаимодействующего с этим разрядом жидкого металла описываются одной и той же системой уравнений магнитной гидродинамики. Указанная система уравнений объединяет уравнение неразрывности, Навье-Стокса, энергии, уравнения Максвелла и закон Ома:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0$$

$$\begin{aligned} \rho(\vec{V} \operatorname{grad}) \vec{V} &= \rho \vec{g} + \vec{E} \operatorname{div} \vec{D} + \vec{j} \times \vec{B} - \operatorname{grad} \left(P + \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} \vec{V} \right) + 2 \operatorname{div}(\mu \dot{S}) \\ \rho \vec{V} \operatorname{grad} \left(h + \frac{1}{2} V^2 \right) &= \vec{j} \vec{E} - q + \vec{V} \operatorname{grad} P + \\ &+ \operatorname{div} \left(2\mu \dot{S} - \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} \vec{V} + \frac{\lambda}{c_p} \operatorname{grad} h \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= 0, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = 0, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0; \\ \vec{E} + \vec{V} \times \vec{B} &= \frac{\vec{j}}{\sigma}; \end{aligned}$$

Система дополняется соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma(T, P), \quad \lambda = \lambda(T, P), \quad \mu = \mu(T, P), \quad \rho = \rho(T, P), \quad q = q(T, P), \\ c_p &= c_p(T, P), \quad h = h(T, P); \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}; \end{aligned}$$

Где \vec{V} - вектор скорости; P- давление; T – температура плазмы; \vec{g} -вектор ускорения свободного падения; \vec{j} -плотность тока, \vec{E} -вектор напряженности электрического поля, \vec{H} вектор напряженности магнитного поля, \vec{B} - вектор магнитной индукции, \vec{D} - вектор электрической индукции, μ_0 – магнитная постоянная, ε_0 - электрическая постоянная, ρ – плотность плазмы, c_p - теплоемкость при постоянном давлении, μ – вязкость, λ - теплопроводность плазмы, q - излучательная способность, σ - электропроводность, h - энтальпия, \dot{S} - тензор скоростей деформации с компонентами:

$$S_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right),$$

где V_i, V_k -компоненты вектора \vec{V} , x_k, x_i - координаты, $i, k=1, 2, 3$. Конкретный вид тензора скоростей деформации зависит от используемой системы координат.

При учете силового и динамического действия дуги на сварочную ванну координаты поверхности расплава при небольших деформациях определяется из дифференциального уравнения движения свободной поверхности расплава:

$$\alpha(T)\nabla\left(\frac{\Delta z}{\sqrt{1+(\nabla z)^2}}\right) - \rho gh = \frac{P_{arc} + P_{vap}}{\sqrt{1+(\nabla z)^2}} - \lambda_L$$

Где h -высота столба жидкого металла, P_{vap} - давление отдачи паров, λ_L – постоянная, имеющая смысл внутреннего давления расплава вследствие деформации его поверхности, $\frac{\Delta z^2}{\sqrt{1+(\nabla z)^2}}$ – кривизна поверхности расплава.

Для решения данной задачи необходимо введение динамически изменяющейся неструктурированной сетки. Такую возможность и дает применение программного пакета OpenFoam CFD.

Расчётные алгоритмы программного комплекса OpenFoam основаны на применении метода конечных разностей и его разновидности – метода конечных объёмов. Компьютерный анализ включает в себя следующие основные шаги:

1. Создание геометрической модели (сложных границ области жидкости).
2. Задание свойств жидкости, физических условий моделирования течения.
3. Задание исходной расчетной области и соответствующей сетки.
4. Задание граничных условий.
5. Проведение расчета.
6. Просмотр результатов расчета в графической форме

Сетка генерируется модулем blockMesh на основании описания сетки в словаре blockMeshDict путем запуска в терминальной консоли из каталога примера простой команды: blockMesh. OpenFOAM всегда работает в 3- мерной декартовой системе координат и все геометрические конфигурации производятся в 3 измерениях. Утилита blockMesh генерирует гексаэдральные структурированные сетки следующим образом:

convertToMeters 0.1;

vertices

```
((0 0 0)
(1 0 0)
(1 1 0)
(0 1 0)
(0 0 0.1)
(1 0 0.1)
(1 1 0.1)
(0 1 0.1));
```

Где директива ConvertToMeters – параметр показывающий масштаб, в разделе vertices задаются координаты точек для построения геометрии, принцип задания которых показан на рис.1.

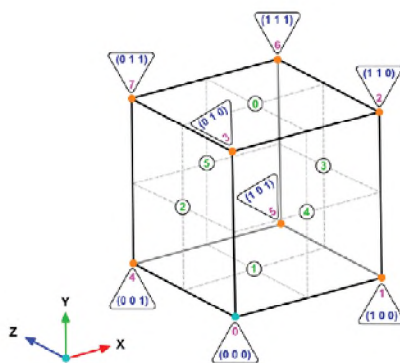


Рис.1 Нумерация координат точек при генерации сетки

Для блочной структуры сеток используются следующие разделы:

- Раздел `bloks`, указывается тип блока, его вершины и параметры разбиения блока;
- Раздел `edges` -криволинейные ребра (дуги окружностей или сплайны)
- Раздел `boundary` - определяют поверхности для задания граничных условий.
- Разделе `mergePatchPairs` -задаются пары поверхностей для слияния

С помощью директивы `simpleGrading` можно организовать неравномерную сетку. Директивы `arc` и `spline` позволяют построить криволинейную сетку (рис.2):

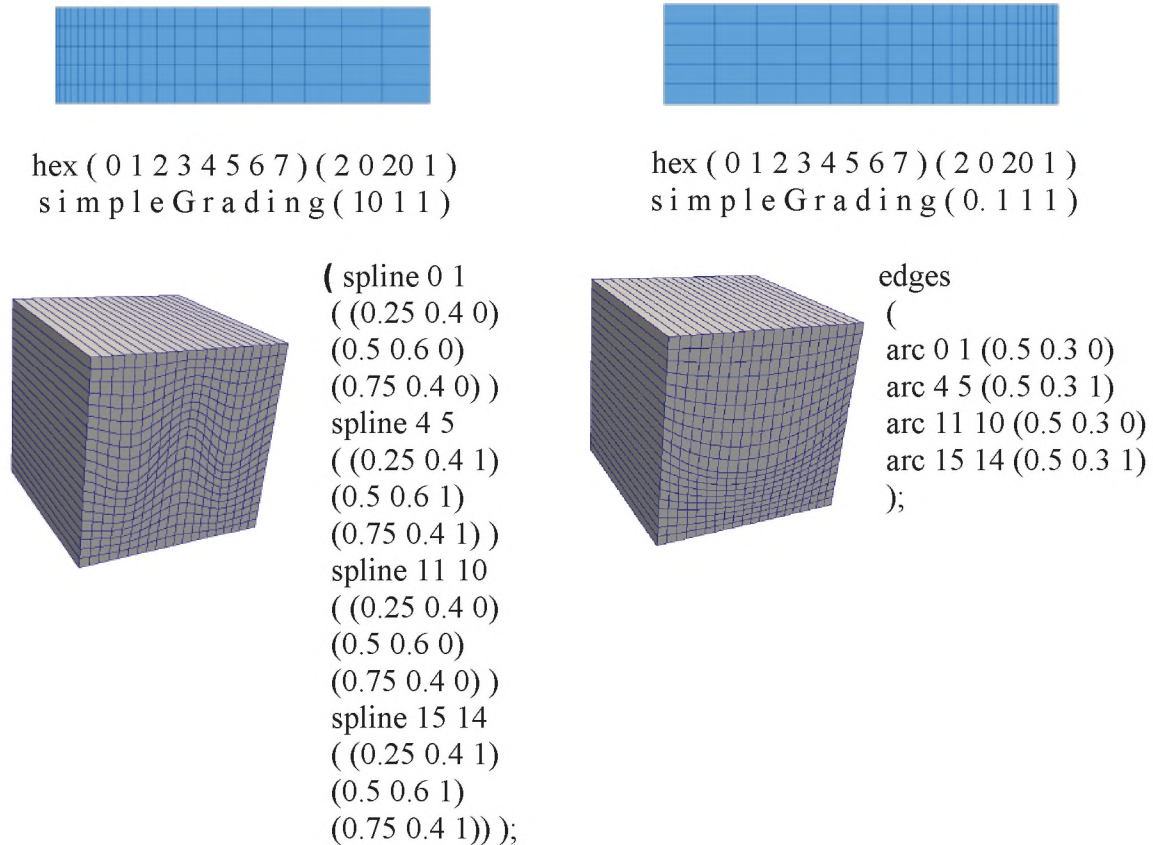
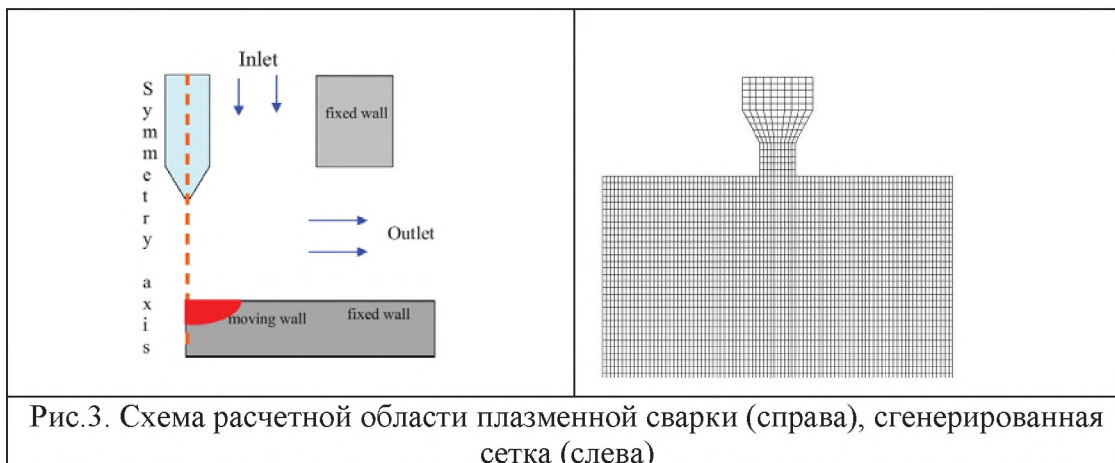


Рис.2. Примеры создания неструктурированных сеток

Данные о самой сетке, используемые OpenFOAM, хранятся в файлах `points`, `cells`, `faces` и `boundary`, которые генерируются в результате запуска `blockMesh`. В файле `boundary` содержится информация о границах расчетной области (количество различных границы, их название и тип).



Используя данную методику для расчетной области электродуговой сварки сгенерирована неструктурированная сетка, представленная на рис.2.

Граничные условия могут быть следующих типов:

fixedValue - граничные условия 1 рода. F

fixedGradient - ГУ 2-го рода, необходимо задать градиент величины на границе.

zeroGradient- ГУ 2-го рода, нулевой градиент на границе.

inletOutlet - действует как ГУ 1-ого рода, если массовый (объемный) поток входит в расчетную область и как ГУ 2-ого рода, если поток выходит из расчетной области.

Mixed, symmetry plane, periodic, cyclic- Смешанное условие, условие симметрии, периодическое и циклическое условие

Приведем постановку граничных условий для температуры:

boundaryField

```
{
  left_wall (торцевая сторона катода, T=300K)
  {
    type fixedValue;
    value uniform $wall_T_c;
  }
  outlet
  {
    type zeroGradient; ( $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ )
  }
  symmetry
  {
    type zeroGradient; ( $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ )
  }
}
```

Температура на границе раздела плазма-обрабатываемое изделие должно быть рассчитано с помощью решателя уравнения энергии для конкретно рассматриваемого случая (однофазный, многофазный, ламинарные или турбулентные течения).

Рабочим языком кода является C++. В терминах данного языка большинство математических дифференциальных и тензорных операторов в программном коде уравнений представлены в удобочитаемой форме:

Таблица 1.

Соответствие между математическими выражениями и выражениями OpenFoam

Термин	Математическое выражение	Запись в OpenFoam
Лапласиан	$\nabla^2 \phi$	laplacian(Gamma,phi)
Производная по времени	$\frac{\partial \phi}{\partial t}$	ddt(phi)
Градиент	$\nabla \phi$	grad(phi)
Дивергенция	$\nabla \phi$	div(psi)
Ротор	$\nabla \times \phi$	Curl(phi)

В данных терминах уравнение неразрывности записывается в следующем виде:

{ solve(fvm::ddt(rho) + fvc::div(phi)); }

Уравнения сохранения в общем интегральном виде

$$\int_{\Delta t} \left[\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{производная по времени}} + \underbrace{\int_V (\rho U \phi) dV}_{\text{конвективное слагаемое}} - \underbrace{\int_V \nabla(\rho \Gamma \nabla \phi) dV}_{\text{диффузионное слагаемое}} \right] dt = \int_{\Delta t} \left[\underbrace{\int_V S(\phi) dV}_{\text{источник}} \right] dt$$

В терминах OpenFoam записывается в следующем виде:

$$\text{fvM::ddt}(\rho, \psi) + \text{fvM::div}(\phi, \psi) - \text{fvM::laplacian}(D\psi, \psi) = \text{fvM::Sp}(S1, \psi) + S2$$

Дискретизация системы уравнений в пакете OpenFOAM проводится по методу конечных объемов (FVM) в декартовой системе координат.

Выводы: Процессы при плазменно-дуговой обработке материалов должны рассматриваться в сквозном комплексе дуга - сварочная - металлургические процессы – термомеханические процессы для получения качественного сварного. Для математического моделирования задачи электродуговой сварки выбран пакет OpenFoam. С использованных встроенных утилит сгенерирована неструктурированная сетка расчетной области, выбраны решатели с учетом наличия движения фазы «плазма-жидкий металл».

Список литературы

1. Электрическая дуга – генератор низкотемпературной плазмы/ А. Жайнаков, В.М. Лелевкин, В.С Мечев. и др. – Бишкек: Илим. – 1991. – 440 с.
2. Жайнаков А. Трехмерная модель расчета электродуговых потоков/ А. Жайнаков, Т.Э Уурсова, Р.М. Урусов // Бишкек: Наука и новые технологии. -1999. -№ 2. с. 3–7.
3. Жайнаков А. К постановке граничных условий для функции «вихрь скорости» на границе «плазма - жидкий металл» / А. Жайнаков, Дж.О Усенканов, Р.Т. Султангазиева// Материалы международной научно- практической конференции «Проблемы вычислительной математики и информационных технологий». Алматы, 1999.
4. Контроль качества сварных соединений: учеб. пособие для сред. проф. обр. / Л.П. Шебеко, А.П. Яковлев. - М. : Стройиздат, 1972. - 120 с.
5. Математическое моделирование электрической дуги/Под ред.Энгельшта В.С.- Фрунзе, Илим. -1983.-362 с.
6. Рыкалин Н.Н. Расчёты тепловых процессов при сварке: учеб. пособие / Н.Н. Рыкалин. — М. : Машгиз, 1951. — 296 с.
7. Судник В.А. Численный анализ дефектов формы сварного шва при дуговой сварке. Машины, технологии и моделировании сварочных процессов /В.А. Судник// Известия ТулГУ.-2008. -Вып.2.- С. 177-185
8. Торопчин А. И. Разработка модели и исследование процесса взаимодействия сжатой электрической дуги с технологическим объектом. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург – 2015
9. . Низкотемпературная плазма. Т.1. Теория столба электрической дуги В.С.Энгельшт , В.Ц. Гурович , Г.А. Десятков, А. Жайнаков и др. – Новосибирск: Наука, 1990.
10. OpenVFOAM. The Open Source CFD Toolbox. User Guide Version 1.5 9th July 2008
11. Tanaka M. Predictions of weld pool profiles using plasma physics / M. Tanaka, J.J. Lowke // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2007. — V. 40. — P. R1-R23.,
12. Tradia A. Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools: Dr.D. thesis / A. Tradia. — Paris: Ecole Polytechnique, 2011. — 224 p.
13. Xiaobo Ren, Hallvard Fj., Dag Lindholm, Magne Rudshaug, Vigdis Olden. Through-process modelling of welding: concept and perspective. Conference Paper, Conference: EuroJoin 9 (2015), January 2015