

На правах рукописи



Хомич Павел Николаевич

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ ЗОН  
СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ  
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Кархин Виктор Акимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Суздаев Игорь Владимирович

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник

Вихман Валерий Борисович

Ведущая организация: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»

Защита состоится «21» февраля 2012 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.26 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, I учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «18» января 2012 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Тисенко В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

При разработке новых материалов различного класса прочности и назначения возникает проблема поиска технологии сварки, обеспечивающей оптимальные свойства сварного соединения. Поскольку технология сварки определяет большое количество параметров, влияющих на свойства сварного соединения и на работоспособность сварной конструкции в целом, это требует проведения большого количества экспериментов, в некоторых случаях весьма сложных и дорогостоящих. Чтобы сократить время и количество экспериментов, используют математическое моделирование. Кроме того, актуальность работ и исследований в области моделирования тепловых процессов при сварке определяется необходимостью прогнозирования структуры и свойств металла при формировании сварного соединения.

Для прогнозирования микроструктуры, механических свойств, диффузии, остаточных напряжений в различных зонах сварного соединения необходимы, прежде всего, сведения о термических циклах (скорость нагрева и охлаждения, максимальная температура и т.д.). Известные расчетные схемы Рыкалина Н.Н. и Rosenthal D. позволяют достаточно точно определить температурное поле в области, где температура нагрева металла не превышает половины его температуры плавления, но приводят к значительным погрешностям в окрестности сварочной ванны. Это объясняется отсутствием в упомянутых схемах учета сложных физических явлений в сварочной ванне (энергетического и механического воздействия сварочного источника теплоты, деформации поверхности ванны, конвективного теплопереноса, вызванного поверхностными и объемными силами, фазовыми превращениями металла и т.д.). Разработанные в последние десятилетия новые модели (Судник В.А., DebRoy T., Zhao H., Zhang W., Roy G.G.) позволяют учитывать эти явления и рассчитывать термические циклы и форму шва при некоторых способах сварки. Однако эти модели требуют знания температурных зависимостей свойств газа и плазмы источника, жидкого металла капель и ванны (коэффициентов поверхностного натяжения, эффективной вязкости и т.п.), а также мощных компьютеров и высокой квалификации исследователей. Частичное отсутствие или большая погрешность исходных данных заставляют калибровать модели по эксперименту и пользоваться частными эмпирическими зависимостями (например, для КПД, коэффициента сосредоточенности и давления дуги), что в итоге понижает точность расчета. По этим причинам существующие модели не нашли широкого применения, в связи с чем, по-прежнему сохраняется актуальность исследований,

направленных на разработку методик и совершенствование моделей, позволяющих прогнозировать структуру и свойства сварных соединений.

Для практических целей часто важна информация о температурном поле в твердой части сварного соединения, что значительно упрощает постановку задачи. При этом необходимо знать граничные условия для твердого тела, включая форму сварочной ванны, которая является результатом, суммирующим воздействие источника теплоты и всех физических процессов в жидком металле. С методической точки зрения форму ванны корректно рассматривать как источник результирующей информации о всех процессах, определяющих тепловую обстановку в зоне сварного соединения. Такой подход значительно упрощает решение задачи и заложен в концепцию «эквивалентного источника теплоты», согласно которой источник теплоты разбивается на несколько составляющих, которые учитывают один или несколько физических процессов, происходящих в сварочной ванне. Вопросами решения обратных температурных задач занимались Тихонов А.Н., Алифанов О.М., Beck J.V. и др. После чего, зная распределение температуры в сварном соединении, можно прогнозировать свойства сварного соединения в различных точках и тем самым дать ответ о пригодности данного режима сварки. В работах таких исследователей, как Касаткин О.Г., Seyffarth P., представлены статистические модели, позволяющие по времени пребывания металла в определенный период охлаждения и его химического состава прогнозировать конечную микроструктуру и свойства. В настоящей работе эта концепция принята за основу, так как она обладает наибольшими потенциальными возможностями в части моделирования тепловой обстановки и процессов в зоне сварки.

**Целью работы** является разработка инженерной методики прогнозирования структуры и свойств сварных соединений с учетом реальной геометрии сварного шва и разработка программных средств расчетно-экспериментальной методики.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Анализ научно-технической литературы по существующим методикам прогнозирования структуры, механических свойств и химической неоднородности сварных соединений.

2. Разработка математических моделей источника теплоты, учитывающих различное распределение плотности мощности по поверхности и толщине изделия.

3. Разработка и обоснование методики решения обратной задачи теплопроводности на базе предложенных моделей.

4. Разработка и верификация программного обеспечения решения прямых и обратных задач теплопроводности для прогнозирования микроструктуры и механических свойств сварного соединения применительно к промышленным технологиям сварки.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны и научно обоснованы математические модели объемных источников теплоты, позволяющие имитировать реальные процессы в сварочной ванне и рассчитывать температурные поля в твердой части сварного соединения при различных способах дуговой сварки.

2. Разработана и верифицирована методика решения обратной температурной задачи, позволяющая по отдельным экспериментальным данным (форма сварочной ванны и проплавления, ЗТВ, термические циклы и т.п.) восстанавливать температурное поле во всей твердой части сварного соединения при сварке.

3. Развита физико-математические модели плавления, кристаллизации и диффузионного массопереноса металла, что позволяет рассчитать химическую неоднородность вблизи границы шва с учетом формы и размеров сварочной ванны, плавления и затвердевания металла, начального распределения примеси в основном металле и ванне, температурной зависимости ее растворимости и коэффициента диффузии.

4. Показано, что химическая неоднородность, формирующаяся на этапе плавления, частично сохраняется вблизи зоны сплавления при кристаллизации металла шва и оказывает влияние на макросегрегацию при сварке плавлением.

5. Разработано программное обеспечение для решения прямых и обратных задач теплопроводности для прогнозирования микроструктуры и механических свойств сварного соединения применительно к промышленным технологиям сварки.

**Объектами исследования** являлось стыковое сварное соединение.

**Методы исследования**

Для решения поставленных задач были использованы: аналитический метод функций Грина решения задачи теплопроводности; численное решение дифференциальных уравнений диффузии на основе метода конечных разностей; решение обратных задач теплопроводности на основе прямого, симплексного поиска, градиентного способа и метода Ньютона; методы исследования структуры и свойств материалов: оптическая микроскопия, методы анализа твердости и микротвердости.

### **Практическая ценность работы**

На основе принятых расчетных схем, выведенных формул и методики решения обратной задачи было разработано программное обеспечение, позволяющее по геометрическим размерам сварного шва определить механические характеристики и прогнозировать структуру металла применительно к низколегированным сталям.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Формулировка и вывод уравнений для описания температурных полей от объемных источников теплоты.
2. Методика решения обратных температурных задач.
3. Разработка и верификация методики прогнозирования микроструктуры и механических свойств сварного соединения.
4. Модель сегрегации химических элементов у границы сплавления.

### **Апробация работы**

Результаты работы были представлены научной общественности и обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

- 10 Всероссийский научно-технический семинар «Обеспечение безопасности и экономичности энергетического оборудования», СПб, 2004;
- Международная научно-техническая конференция «Компьютерные технологии в соединении материалов», 2004 – 2005, Тула;
- Proceedings of Joint International Conference “Computer Technology in Welding and Manufacturing (16th Intern. Conf.) and Information Technologies in Welding and Related Processes (3rd Intern. Conf.)”, Kiev, 2006;
- 11<sup>th</sup> Nolamp Conference on Laser Processing of Materials, Finland, Lappeenranta, August 20 – 22, 2007;
- Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов, XXXVI неделя науки СПбГПУ, 2005, 2008.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 9 научных работах, из них 5 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ.

**Личный вклад автора.** При выполнении работ по теме диссертации автором выполнен анализ проблемы, определена цель работы и осуществлена постановка задач исследования, разработаны математические модели тепловых источников, получены частные решения этих задач. Диссертантом аналитически выведены формулы для определения температурных полей, разработана методика и программное обеспечение для решения обратных температурных задач, сделан анализ результатов и

подготовка материалов для печатных работ и докладов на конференциях. Участие соавторов отражено в перечне публикаций, результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия авторов. Автором выполнены анализ и обработка полученных данных, осуществлена верификация результатов и формулировка выводов.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 149 машинописных листах, включая 83 рисунка, 2 таблицы и 102 наименований библиографических ссылок.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении показана актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показана научная новизна и практическая ценность, представлены основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе приведены аналитические и численные методы решения прямых и обратных температурных задач, диффузионных задач, показаны существующие методики прогнозирования микроструктуры и механических свойств сварного соединения. Наиболее оптимальными, с точки зрения временных затрат, являются аналитические методы, в частности, метод функций Грина, который был принят в качестве основного для решения температурных задач. Приведены основные расчетные схемы, описывающие распределения теплоты таких источников, как электрическая дуга, газосварочное пламя, лазерный и электронный луч.

Во второй главе предлагается для более точного решения температурной задачи, описания контура сварочной ванны или формы проплавления, полученных практически, взять такие схемы источников теплоты, которые в максимальной степени могли бы учесть сложные физические явления, происходящие в сварочной ванне и, как следствие, обеспечить более точное описание контура ванны. Были предложены и выведены следующие модели источников теплоты:

1. Модель>NNL, плотность мощности вдоль осей  $x$  и  $y$  изменяется по нормальному закону, а вдоль оси  $z$  по линейному (рис. 1, а).

$$q_3(x, y, z) = q_3(0,0,0) \exp \left[ -\left( \frac{x}{x_e} \right)^2 - \left( \frac{y}{y_e} \right)^2 \right] (1 - k_L z), \quad x, y, z \in V,$$

где  $k_L = (e - 1)/(e z_e)$ ,  $m^{-1}$ ;  $x', x'', y', y'', z', z''$  – границы области действия источника;  $V$  – область действия источника  $q_3(0,0,0)$  – плотность мощности при  $x = y = z = 0$ ,  $Вт/м^3$ ;  $x_e, y_e, z_e$  – параметры распределения источника нагрева, м.

$$q_3(0,0,0) = \frac{4q}{\pi x_e [\Phi(x''/x_e) - \Phi(x'/x_e)] y_e [\Phi(y''/y_e) - \Phi(y'/y_e)]} * \\ * \frac{1}{[z''(1 - k_L z''/2) - z'(1 - k_L z'/2)]}$$

Здесь  $q$  – мощность. Вне области мощность источника равна нулю. Функция  $\Phi$  – интеграл ошибок.

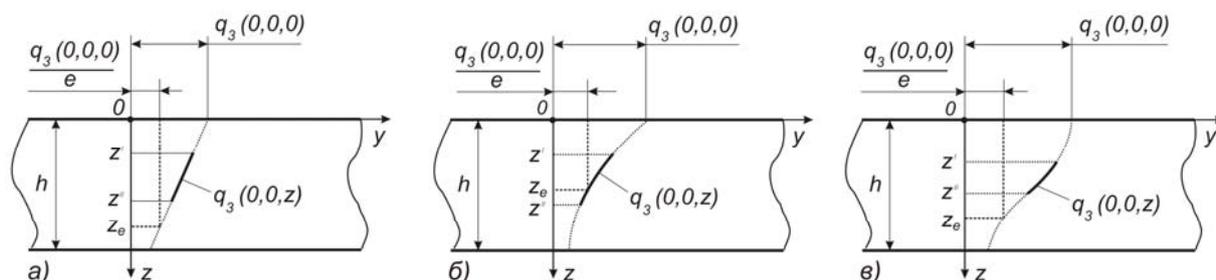


Рис. 1 Распределение объемной плотности мощности эффективного источника теплоты, линейно (а), экспоненциально (б) и нормально (в) распределенного по толщине пластины.

2. Модель NNE, плотность мощности вдоль осей  $x$  и  $y$  изменяется по нормальному закону, а вдоль оси  $z$  по экспоненциальному (рис. 1, б).

$$q_3(x, y, z) = q_3(0,0,0) \exp\left(-\left(\frac{x}{x_e}\right)^2 - \left(\frac{y}{y_e}\right)^2 - \frac{z}{z_e}\right), \quad x, y, z \in V$$

3. Модель NNN, плотность мощности вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  изменяется по нормальному закону (рис. 1, в).

$$q_3(x, y, z) = q_3(0,0,0) \exp\left(-\left(\frac{x}{x_e}\right)^2 - \left(\frac{y}{y_e}\right)^2 - \left(\frac{z}{z_e}\right)^2\right), \quad x, y, z \in V$$

При выводе температурных зависимостей с использованием предложенных моделей источников теплоты в работе были рассмотрены варианты, соответствующие граничным условия 2 и 3 рода на поверхностях плоского слоя.

Температурное поле от мгновенного NNL источника в плоском слое толщиной  $h$  без поверхностной теплоотдачи:

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q}{c\rho} f_x(x, t) f_y(y, t) f_{z13}(z, t),$$

где

$$f_x(x,t) = \frac{1}{[\Phi(x''/x_e) - \Phi(x'/x_e)]\sqrt{\pi(4at + x_e^2)}} \exp\left(-\frac{(x+vt)^2}{4at + x_e^2}\right) * \left\{ \Phi\left(\frac{-(x+vt)x_e}{\sqrt{4at(4at + x_e^2)}} + \frac{x''}{x_e} \sqrt{1 + \frac{x_e^2}{4at}}\right) - \Phi\left(\frac{-(x+vt)x_e}{\sqrt{4at(4at + x_e^2)}} + \frac{x'}{x_e} \sqrt{1 + \frac{x_e^2}{4at}}\right) \right\};$$

$$f_y(y,t) = \frac{1}{[\Phi(y''/y_e) - \Phi(y'/y_e)]\sqrt{\pi(4at + y_e^2)}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at + y_e^2}\right) * \left\{ \Phi\left(\frac{-yy_e}{\sqrt{4at(4at + y_e^2)}} + \frac{y''}{y_e} \sqrt{1 + \frac{y_e^2}{4at}}\right) - \Phi\left(\frac{-yy_e}{\sqrt{4at(4at + y_e^2)}} + \frac{y'}{y_e} \sqrt{1 + \frac{y_e^2}{4at}}\right) \right\};$$

$$f_{z13}(z,t) = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{1}{[z''(1 - k_L z''/2) - z'(1 - k_L z'/2)]} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (1 - kz'') \sin\left(\frac{\pi n z''}{h}\right) - (1 - kz') \sin\left(\frac{\pi n z'}{h}\right) - \frac{kh}{\pi n} \left[ \cos\left(\frac{\pi n z''}{h}\right) - \cos\left(\frac{\pi n z'}{h}\right) \right] \right\} \cos\left(\frac{\pi n z}{h}\right) \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{at}{h^2}\right)$$

Здесь приведено решение в виде ряда Фурье. Установлено, что если критерий  $Fo$  больше  $10^{-5}$ , то время решения температурной задачи меньше для уравнений, представленных в виде ряда Фурье, в противном случае, для ускорения решения задачи желательно воспользоваться уравнениями, полученные методом отображения.

В работе также получены решения для соответствующих источников теплоты, в случае если тело полубесконечное, с граничными условиями 2 и 3 родов. Эти уравнения приведены в диссертационной работе и [5].

В третьей главе рассмотрено решение обратной задачи теплопроводности следующими методами:

- нулевого порядка (алгоритм прямого и симплекс поиска)
- первого порядка (градиентный метод)
- второго порядка (метод Ньютона)

В общем случае искомыми параметрами одного источника теплоты являются вектор  $\mathbf{p} = \{q, x_e, y_e, z_e, x', x'', y', y'', z', z''\}$ . При этом модель может включать несколько отдельных источников. Вектор неизвестных  $\mathbf{p}$  найдем с помощью отдельных экспериментальных данных. Вектор функции отклика представляется в виде:

$$\mathbf{f} = \{f_1, f_2, \dots, f_N\},$$

где  $N$  – количество измерений. Более полная экспериментальная информация о температурном поле позволяет упростить и точнее решить обратную задачу. В качестве исходных экспериментальных данных для решения обратной задачи использовались: мгновенное значение температуры, максимальное значение температуры, термический цикл, длина изотермы.

Неизвестные параметры  $\mathbf{p}$  определяют из условия наилучшего приближения расчетных результатов к экспериментальным данным. Соответствующую задачу оптимизации (минимизации функции цели  $F$ ) можно представить в виде:

$$F(\mathbf{p}) = \sum_{n=1}^N w_n [f_n^m - f_n(\mathbf{p})]^2 \rightarrow \min,$$

где  $N$  – количество измерений,  $f_n$  и  $f_n^m$  – расчетная и заданная характеристики температурного поля в  $n$ -ой точке измерения (длина ванны, температура, максимальная температура и т.д.),  $w_n$  – весовые множители для характеристики температурного поля в  $n$ -ой точке.

В качестве примеров в работе показано решение обратных задач теплопроводности для следующих способов сварки: лазерная и аргонодуговая, в частности, лазерная сварка пластин толщиной 2 мм из стали S355J2G3 ( $C \leq 0,20$  %,  $Mn \sim 1,60$  %,  $Si \sim 0,55$  %,  $S \leq 0,035$  %,  $P \leq 0,035$  %), режим:  $q = 1800$  Вт,  $v = 16,67$  мм/с,  $T_0 = 293$  К. Свойства стали:  $a = 6,5$  мм<sup>2</sup>/с,  $c\rho = 0,0049$  Дж/(мм<sup>3</sup> К), температура плавления  $T_L = 1773$  К. В качестве исходных данных взяты координаты точек границы шва в поперечном сечении, в которых задавалась максимальная температура ( $T_{\max} = T_L$ ), и замеренные термические циклы трех точек, расположенных на поверхности пластин на различном расстоянии от оси шва. Температурное поле рассчитывалось по модели NNL (плоский слой, границы тела адиабатические).

В результате решения обратной задачи нашли неизвестные параметры источника, а по ним восстановили температурное поле. Расчетные и экспериментальные шлифы совпадают удовлетворительно (рис. 2).

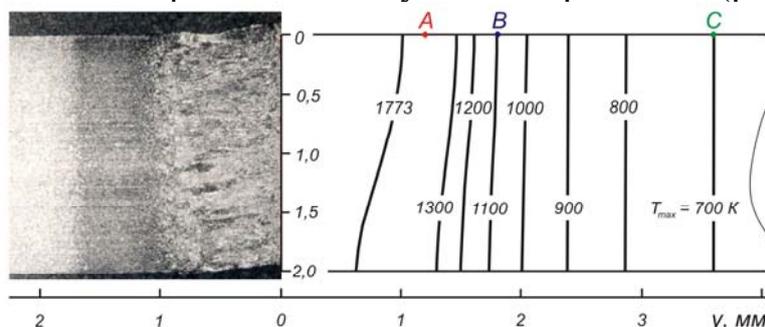


Рис. 2 Сравнение экспериментального (слева) и расчетного (справа) поперечного сечения сварного соединения.

В работе приведены примеры решения обратных задач для других способов сварки.

В четвертой главе предложена модель, позволяющая определить изменение химического состава металла вблизи границы сплавления с учетом формы и размеров сварочной ванны, процессов плавления и кристаллизации металла, температурной зависимости его растворимости и коэффициента диффузии ликвирующего элемента, наличия гидродинамически неперемешивающегося жидкого граничного слоя на фронте затвердевания.

В модели плавления и кристаллизации металла были приняты следующие допущения:

- Фронт плавления и затвердевания задается изотермой ликвидус  $T_L = \text{const}$ . В действительности по мере затвердевания (по мере роста концентрации перед фронтом затвердевания) величина  $T_L$  уменьшается, что учитывается в работе.
- Направление плавления и роста кристаллов совпадает с направлением температурного градиента  $G$ , то есть не учитывается влияние кристаллографической ориентации и селекции зерен.
- Фронт затвердевания в пределах кристаллита является плоским, то есть мода затвердевания является планарной.

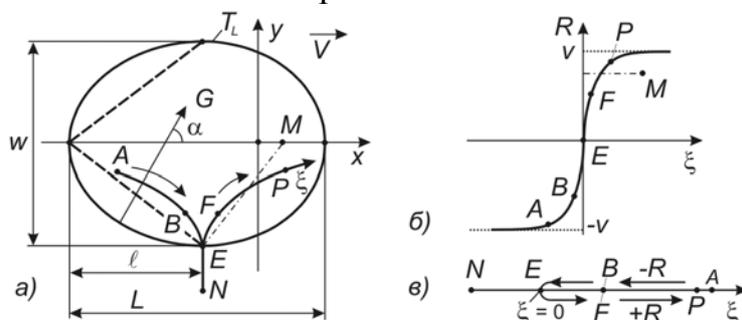


Рис. 3 Сварочная ванна и траектории плавления (отрезок АВЕ) и затвердевания (отрезок ЕFP при овальной форме ванны или ЕМ при каплевидной форме ванны) (а); скорость плавления ( $R < 0$ ) и затвердевания ( $R > 0$ ) (б) и координатная система в диффузионной задаче (в). Штриховыми линиями показана каплевидная форма сварочной ванны.

Траектория подвижной точки, находящейся на фронте плавления и затвердевания, описывается кривой АВЕFP (рис. 3, а). Вблизи границы шва (точки Е) траектории плавления и затвердевания совпадают, то есть плавится и кристаллизуется один и тот же металл. Принято, что плавлению соответствует  $-R$ , а затвердеванию  $+R$ . Вблизи границы шва значения скорости плавления и затвердевания практически одинаковые. Если форма ванны каплевидная, то есть граница хвостовой части ванны плоская (на рис.

3, а показана штриховыми прямыми), то траектория роста кристаллита описывается прямой ЕМ, а скорость роста постоянна (рис. 3, б).

Искомая концентрация примеси  $C(\xi, t)$  на межфазной границе  $\xi_{SL}$  терпит разрыв:

$$k = \frac{C_S(\xi_{SL}(t), t)}{C_L(\xi_{SL}(t), t)},$$

где  $k$  – коэффициент распределения,  $k = k(t)$ ,  $C_S$  и  $C_L$  – концентрация примеси в твердой и жидкой фазах. Разрыв искомой функции  $C(\xi, t)$  может быть устранен с помощью новой функции (потенциала массопереноса):

$$U(\xi, t) = C(\xi, t) / S(\xi, t),$$

где  $S$  – растворимость элемента примеси.

Постановка диффузионной задачи относительно функции  $U(\xi, t)$  имеет вид [9]:

1. Уравнение диффузии

$$A \frac{\partial(SU)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( ASD \frac{\partial U}{\partial \xi} \right) + Af, \quad \xi_N < \xi < \xi_{SL}(t) + \delta_h(t)$$

2. Начальное условие

$$U(\xi, 0) = C_0 / S(\xi, 0), \quad \xi_N < \xi < \xi_{SL}(0) + \delta_h(0)$$

3. Граничные условия

$$U(\xi_N, t) = C_0 / S(\xi_N, t)$$

$$U(\xi_{SL}(t) + \delta_h(t), t) = C_{0L} / S(\xi_{SL}(t) + \delta_h(t), t)$$

где  $C$  – концентрация элемента;  $D$  – коэффициент диффузии;  $f$  – функция, учитывающая источник (сток) элемента за счет разложения (образования) химических соединений и ввода присадочного материала;  $C_{0L}$  – концентрация элемента в гидродинамически перемешивающейся части сварочной ванны;  $A$  – площадь поперечного сечения кристаллита;  $\delta_h$  – гидродинамически перемешивающийся слой.

Растворимость  $S$  разрывна на границе фаз, а искомая функция  $U(\xi, t)$  непрерывна. Поставленная задача может быть решена аналитически только в частных случаях при существенных дополнительных допущениях. В работе она решалась численным методом конечных разностей.

Проведенными расчетами показано, что если гидродинамически перемешивающийся слой  $\delta_h \geq 20$  мкм, то он практически не оказывает влияния на концентрацию примеси в сварочной ванне ( $C_{0L} \approx C_0$ ), в противном случае, его толщину необходимо учитывать.

В качестве примера рассмотрим сварку стальных пластин большой толщины в среде аргоногелиевой смеси без присадочного металла. Режим сварки: эффективная мощность дуги  $q = 3030$  Вт, скорость  $v = 2,6$  мм/с,

начальная температура  $T_0 = 293$  К. Ширина шва  $W = 10$  мм, глубина шва 5 мм.

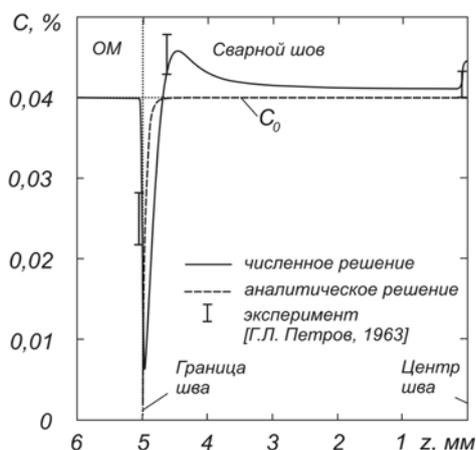


Рис. 4 Распределение концентрации серы по поперечному сечению шва после полного остывания.

После полного остывания экспериментальным методом радиографии определяли концентрацию серы в поперечном сечении шва (рис. 4). Начальное распределение серы было равномерным,  $C_0 = 0,04$  %. При расчете принимали толщину граничного слоя  $\delta_n = 0,05$  мм, что соответствует среднему экспериментальному значению. Около границы шва со стороны основного металла концентрация серы значительно меньше начальной, а со стороны шва – немного больше начальной. Наблюдается повышенная концентрация серы на поверхности в центре шва. Из рисунка следует, что совпадение расчета с экспериментом качественно удовлетворительное.

Таким образом, по предложенной методике можно рассчитать распределение любого элемента по сечению шва.

В пятой главе, используя диаграммы анизотермического распада аустенита и решение обратной задачи, прогнозировали свойства сварного соединения.

В качестве примера в работе рассмотрена дуговая сварка неплавящимся электродом теплоустойчивой стали 12Х1МФ толщиной 7 мм. Режим сварки:  $I = 250$  А,  $U = 12$  В,  $v = 5$  мм/с,  $T_0 = 293$  К. Принимали следующие свойства:  $a = 9,40$  мм<sup>2</sup>/с,  $c\rho = 0,0035$  Дж/(мм<sup>3</sup> К), температура плавления  $T_m = 1773$  К (1500 °С),  $A_{C3} = 1173$  К (900 °С).

Металл, нагретый выше  $A_{C3} = 1196$  К, охлаждается в диапазоне 1123 К – 773 К (850 °С – 500 °С) в течение 5,6 с. Такая длительность охлаждения  $t_{850/500}$  соответствует конечной микроструктуре, состоящей из 76 % бейнита и 24 % мартенсита, и следующим механическим свойствам (при 20 °С): твердость 270 НV30, предел текучести  $\sigma_T = 670$  МПа, предел прочности

$\sigma_B = 750$  МПа, относительное удлинение  $\delta = 24$  %, ударная вязкость  $KCV = 20$  Дж. Механические свойства основного металла следующие (при  $20$  °С):  $150$  HV30,  $\sigma_T = 450$  МПа,  $\sigma_B = 580$  МПа,  $\delta = 28$  %,  $KCV = 32$  Дж. Расчетные распределения твердости удовлетворительно совпадают с экспериментальными (рис. 5). Среднее экспериментальное значение твердости равно  $287$  HV30, а расчетное  $270$  HV30.

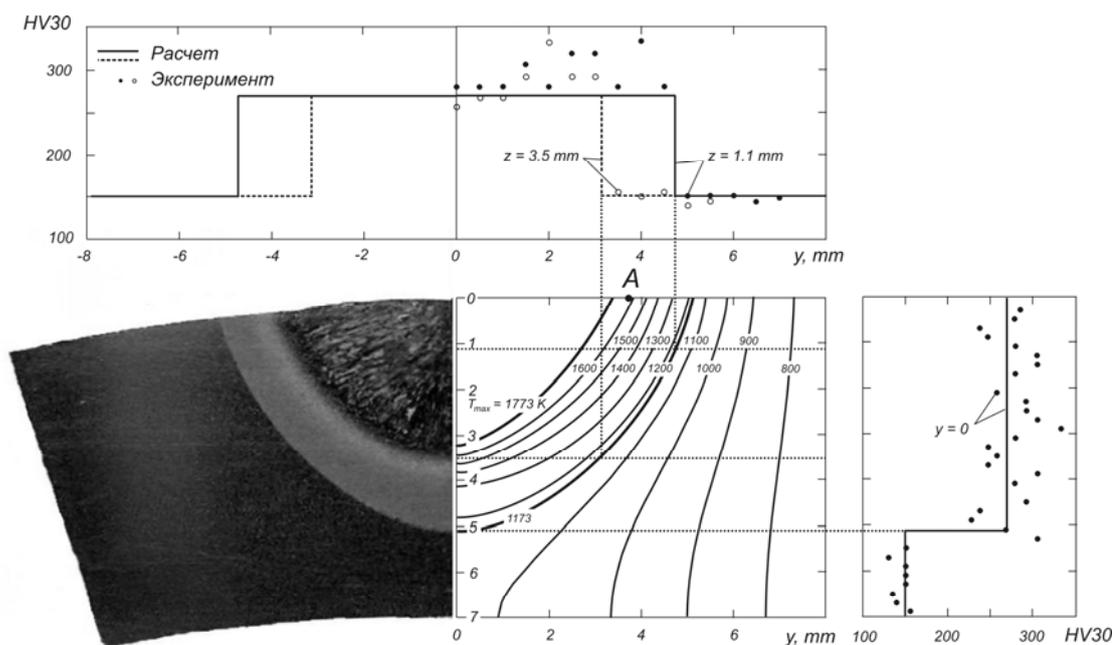


Рис. 5 Поле максимальной температуры  $T_{max}$  и распределение твердости HV30 в сечении сварного соединения после TIG сварки (сталь 12X1МФ,  $I = 250$  А,  $U = 12$  В,  $v = 5$  мм/с)

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для теоретического анализа тепловой обстановки при сварке предложены модели объемных источников теплоты с нормальным распределением плотности мощности в плоскости тела и линейным, экспоненциальным и нормальным распределениями по его толщине.

2. Полученные аналитические решения позволяют рассчитать температурные поля от предложенных источников теплоты как с учетом, так и без поверхностной теплоотдачи на поверхностях плоского слоя и полубесконечного тела. Выявлена зависимость скорости решения задач по уравнениям, полученным с помощью методов отображения и ряда Фурье, с целью ускорения решения обратных задач.

3. Сформулирована и решена обратная задача теплопроводности. Показано, что для решения обратных задач наиболее устойчивым являются методы нулевого порядка. Для сложных задач, с большим количеством

неизвестных, скорость решения обратной задачи методами второго порядка быстрее (для лазерной и аргонодуговой сварки).

4. Разработанная расчетная методика позволяет определять химическую неоднородность шва с учетом формы и размеров сварочной ванны, плавления и затвердевания металла, начального распределения примеси в основном металле и ванне, температурной зависимости ее растворимости и коэффициента диффузии, толщины гидродинамически не перемешивающегося жидкого слоя на фронте затвердевания.

5. Показано, что этап плавления металла может оказать существенное влияние на формирование химической неоднородности вблизи границы шва. В частности, формирующаяся при высокой температуре неоднородность распределения углерода и серы вблизи границы шва частично сохраняется после полного остывания сварного соединения. Проведенными расчетами показано, что если гидродинамически неперемешивающийся слой  $\delta_h \geq 20$  мкм, то он практически не оказывает влияния на концентрацию примеси в сварочной ванне. Результаты теоретического анализа подтверждены экспериментальными данными распределения серы вблизи границы шва, полученными методом радиографии.

6. Разработанные компьютерные программы, основанные на предложенных методических подходах, позволяют оценивать распределение механических свойств металла по зонам сварного соединения с учетом реальной геометрии сварного шва.

#### **Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

1. Кархин В.А., Хомич П.Н. Энергетическая эффективность импульсной дуговой сварки. Материалы 10 Всероссийского научно-технического семинара «Обеспечение безопасности и экономичности энергетического оборудования». – 2004. – С. 238 – 243.

2. Кархин В.А., Хомич П.Н. Оптимизация режима импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом. Известия ТулГУ. Серия «Компьютерные технологии в соединении материалов». Выпуск 3. Труды Международной научно-технической конференции «Компьютерные технологии в соединении материалов» / Под. Ред. Судника В.А. – Тула: изд. ТулГУ, – 2005. – С. 194 – 208.

3. Кархин В.А., Хомич П.Н. Минимизация погонной энергии при импульсной сварке // Сварочное производство. – 2006. – № 10. – С. 3 – 6.

4. Кархин В.А., Хомич П.Н., Оссенбринк Р., Михайлов В.Г. Расчетно-экспериментальная методика определения температурного поля при лазерной сварке // Сварочное производство. – 2006. – № 12. – С. 13 – 17.

5. Karkhin V.A. Homich P.N., Michailov V.G. Prediction of microstructure and mechanical properties of weld metal with consideration for real weld

geometry. Proceedings of Joint International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing (16<sup>th</sup> Inter. Conf.) and Information Technologies in Welding and Related Processes (3<sup>rd</sup> Intern. Conf.)» / Eds. W. Lucas, V.I. Makhnenko. – Kiev. – 2006. – P. 162 – 166.

**6. Раямяки П., Кархин В.А., Хомич П.Н. Определение основных характеристик температурного поля для оценки типа затвердевания металла шва при сварке плавлением // Сварочное производство. – 2007. – № 2. – С. 3 – 7.**

7. Karkhin V.A., Homich P.N., Michailov V.G. Analytical-experimental technique for calculating the temperature fields in laser welding. 11<sup>th</sup> Nolamp Conference on Laser Processing of Materials / Eds. V. Kujanpaa and A. Salminen. – August 2007. – Finland, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 273, ISSN 1456-4491. – P. 263 – 277.

**8. Кархин В.А., Хомич П.Н., Раямяки П. Анализ химической макронеоднородности вблизи границы сплавления при сварке плавлением // Сварочное производство. – 2008. – № 8. – С. 3 – 8.**

9. Rajamaki P., Karkhin V.A., Homich P.N. Analysis of macrosegregation near fusion boundary in fusion welding // Science and Technology of Welding and Joining. – 2010. – Vol. 15 № 1. – P. 31 – 39.