

торца проволоки, в результате чего капля перемещается на ее боковую поверхность. В описываемых условиях плотность плазменных потоков, как и в предыдущем варианте, моделируется как плотность окружающего воздуха.

Выводы

1. Сравнение видеogramм моделируемых процессов показывает, что при импульсном движении пипетки благодаря накопленной кинетической энергии скорость перехода капли в жидкую ванну на порядок выше, чем при неподвижно закрепленной с равномерно увеличивающейся в объеме каплей.
2. Приводимая модель дает возможность определить преимущество сварки с импульсной подачей сварочной проволоки перед сваркой с непрерывной подачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кушлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1982. — 519 с.
2. Гегузин Я.Е. Капля. — М.: Наука, 1973. — 160 с.

3. Увеличение длины капли поглощает энергию капли, уменьшая ее кинетическую составляющую на момент касания каплей с жидкой ванной, следовательно, при импульсном движении капли скорость ее перехода зависит от расстояния между остановившейся каплей и жидкой ванной.
4. Скорость перехода капли в жидкую ванну и ее отрыв от жидкого носителя зависит от энергии (потенциальной и кинетической), накопленной каплей до касания ее с жидкой ванной, поэтому при импульсной подаче капли жидкости скорость ее перехода на порядок выше, чем при нарастании массы без движения.
5. При сварке с короткими замыканиями сварочной дуги силы поверхностного натяжения играют положительную роль в переходе капли в сварочную ванну.

3. Патапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
4. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.

УДК 548.4.001:621.791.052.08:620.179.16

МЕХАНИЗМ ЗАРОЖДЕНИЯ, ФОРМИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКА НЕПРОВАРА В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ. Ч. 1

А.М. Апасов, А.А. Апасов

Юргинский технологический институт Томского политехнического университета
E-mail: adm@ud.tpu.edu.ru

Приведены результаты модельных и экспериментальных исследований процесса зарождения, формирования и развития непровара в процессе сварки. Данные модели позволили затем одновременно осуществлять регистрацию непровара в реальном масштабе времени и формировать управляющие сигналы для коррекции параметров режимов сварки.

1. Анализ дефектов в сварных соединениях

Анализ причин отказов, выхода из строя и аварий машин, агрегатов и конструкций показывает, что в большинстве случаев это происходит в результате наличия дефектов в конструктивных элементах, допущенных в процессе их изготовления или возникших при эксплуатации [1]. Дефекты существенно сокращают долговечность конструктивных элементов, а период развития усталостных трещин в зависимости от условий эксплуатации, режима циклического нагружения и величины концентрации напряжений может составлять существенную, а в ряде случаев и преобладающую часть общей долговечности конструкционного элемента.

Весьма большую группу технологических дефектов составляют дефекты сварки. При циклическом нагружении непровары, поры, шлаковые включения и их цепочки оказывают значительное влияние

на сопротивление усталости сварных соединений металлов [2–4], особенно, если они расположены в зоне остаточных растягивающих напряжений [4]. Степень опасности таких дефектов для материалов, работающих при малоцикловом нагружении, принято оценивать по коэффициентам снижения усталостной прочности K_f [3] и коэффициентам деформаций K_ϵ [5], используемых для расчета долговечности до зарождения трещины.

Полученные значения K_f для различных типов дефектов при ручной электродуговой сварке, выполненной различными сварочными материалами, применяемыми для исследования сталей, представлены в [1].

Сопоставление с расчетными значениями $K_{\epsilon_{\max}}$ демонстрирует достаточно хорошее совпадение результатов для одиночных дефектов типа пор и шлаковых включений. Для острых дефектов типа непровара и

цепочек шлаковых включений, имеющих нерегулярную форму, расчетные значения K_{max} оказываются выше, чем экспериментальные значения K_f . Значения коэффициентов K_f для различных видов сварочных дефектов в малоуглеродистых низколегированных сталях находятся в следующих пределах [3]:

Поры	2...3
Шлаковые включения	3...5
Острые шлаковые включения	5...7
Цепочка шлаковых включений и пор	6,5...9
Непровар	9...15

Представление о степени снижения пределов выносливости в зависимости от размеров дефектов в сварных соединениях конструктивных сплавов дают результаты в табл. 1 и на рис. 1 [3], рис. 2, а, б [1].

Таблица 1. Коэффициенты снижения усталостной прочности для сварных соединений (ручная сварка) с дефектами при малоцикловом нагружении [3]

Марка стали	Электроды	Тип дефекта	Размеры дефекта, мм	K_f
15X2МФА	Н6	Шлаковые включения	1×3,5	1,60
			2×3	1,95
			2,8×3	2,25
		Непровар	4...5	4,00
			10	5,00
22К	УОНИ – 13/45	Шлаковые включения	1×3,5	1,4
			2×3	1,55
			2,8×3	1,85
		Непровар	2...3	2,85
4...6	3,70			
0X18Н10Т	18 Cr 16 Ni 2 Mo	Шлаковые включения	2×3	1,18
			3×3	1,44
			4×3	1,84
		Непровар	5	2,70

Теоретическая оценка коэффициентов концентрации напряжений (с помощью решения Нейбе-

ра) в непроварах [1] показала, что для глубокого непровара (занимающего 50 % толщины сечения) теоретический коэффициент концентрации равен 23; действительные напряжения на расстоянии 0,5...1 мм от основания непровара превышают номинальные в 5,5...8,2 раз. При малом непроваре (6...7 % толщины сечения) максимальный теоретический коэффициент концентрации равен 4, а действительные напряжения на расстоянии 0,5...1 мм от поверхности дна непровара в 1,7...2 раза превышают номинальные.

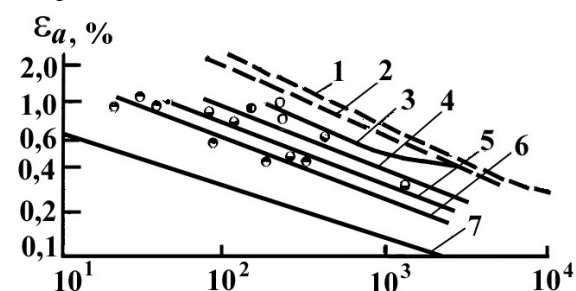


Рис. 1. Малоцикловая усталость сварных соединений из стали 15X2МФА с внутренними технологическими дефектами [1]: 1 и 3) разрушение образцов без дефекта и с ним; 2) появление трещины в образцах без дефекта; 4–7) появление трещины в образцах со шлаком диаметром, равным 1,0; 2,0; 2,8 мм и непроваром

В целом вопрос о влиянии пор, неметаллических включений, непроваров на статическую и циклическую прочность конструктивных элементов в конечном счете не может с достаточной для практики точностью быть решен только расчетным способом и требует, как правило, экспериментального обоснования путем испытаний образцов, моделей, а в ряде случаев и натурных испытаний конструкций.

Обычно для контроля качества сварных соединений используют акустические методы: теневой,

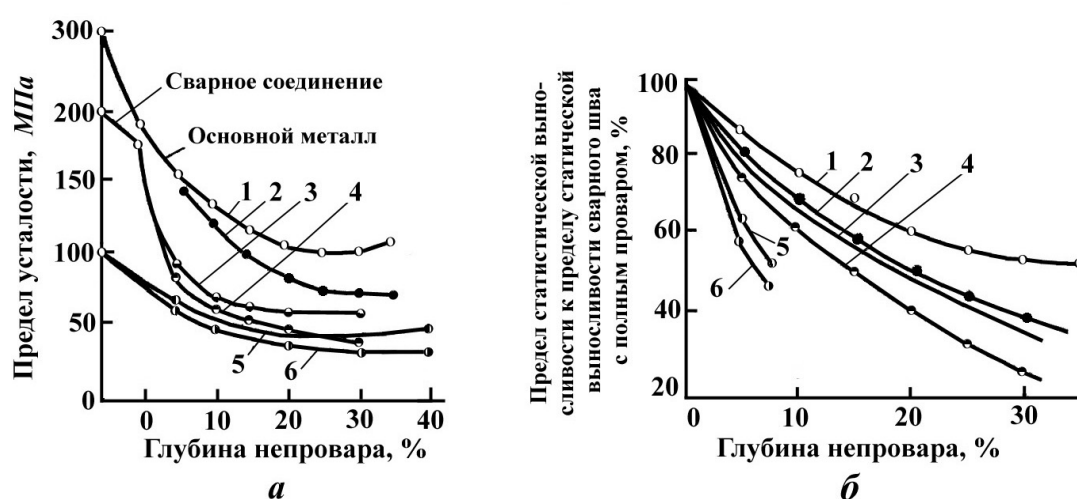


Рис. 2. Влияние глубины непровара на усталость сварных швов: а) влияние глубины непровара на предел выносливости сварных образцов — сталь марки 30ХГСА. Сечение: 1) ослабленное непроваром; 2) без учета ослабления, сталь марки 1X18Н9Т; 3) ослабленное непроваром; 4) без учета ослабления, дуралюмин марки Д16Т; 5) ослабленное непроваром; 6) без учета ослабления; б) прочность стыковых швов при повторно-статических нагрузках — сталь марки 30ХГСА. Сечение: 1) ослабленное непроваром; 2) без учета ослабления, дуралюмин марки Д16Т; 3) ослабленное непроваром; 4) без учета ослабления, сталь марки 1X18Н9Т; 5) ослабленное непроваром; 6) без учета ослабления

зеркально-теневой, эхо-импульсный [6]. Общим их недостатком является наличие временной мертвой зоны, представляющей собой неконтролируемый поверхностный слой, в котором эхо-сигнал от дефекта не отделяется от зондирующего. Кроме того, определение характера дефектов, в том числе особо опасных плоскостных дефектов с малым раскрытием (трещин, тонких непроваров), с точки зрения эксплуатационной надежности изделий – одна из наиболее трудных задач для ультразвукового контроля. До настоящего времени многие инструкции и нормы оценки качества изделия исходят из предположения о невозможности определить характер дефекта с помощью ультразвука [7].

Наиболее перспективен способ контроля качества сварного соединения, заключающийся в приёме сигналов акустической эмиссии (АЭ), рождаемых исследуемым швом, подсчёте количества импульсов и их интенсивности, по которым судят о качестве сварного шва, причём с целью повышения достоверности и уменьшения трудоёмкости при контроле сварных соединений типа труба – трубная доска, прием сигналов АЭ осуществляют в момент производства сварного шва в двух точках отдельных частей сварной конструкции пьезопреобразователями, один из которых устанавливается на трубе, а другой – на трубной доске, и по соотношению количества импульсов АЭ и их интенсивности на разных пьезопреобразователях судят о качестве сварного соединения, в частности, о наличии непровара [8].

Отметим недостатки данного способа:

1. Не рассматривается физическая природа источников, объясняющих причину зарождения непровара.
2. Не разработан механизм зарождения, формирования и развития непровара.
3. В качестве информативного параметра используется интенсивность импульсов АЭ, характеризующая скорость появления дефектов, но не установлен тот тип параметра АЭ-излучения, который непосредственно свойственен процессу зарождения и развития непровара, в частности, при импульсной аргодуговой сварке изделий из однородного металла.

Поэтому основной задачей исследования является выявление механизма зарождения, развития и формирования непровара в процессе сварки.

2. Решение динамической задачи термоупругости на границе основного и наплавленного металла

Поставленная задача решается следующим образом [9]. По границе сплавления основного и наплавленного металла шва при импульсном нагреве и интенсивном охлаждении при сварке изделий из однородного металла изменение температурного поля вызывает термические напряжения (пики). Поэтому данная задача относится к категории нестационарной, в связи с чем необходимо учитывать инерционные члены, так как они будут вносить существенный вклад в окончательное решение. В данном случае решается одномерная задача термо-

упругости. При этом учитываются инерционные члены в уравнениях движения упругой среды, а искомое выражение сводится к уже известному решению задачи Даниловской [10].

Предположим, что температура упругой среды задана как функция координаты x и времени t , т.е. $T=T(x,t)$. Напряжения, возникающие из-за неравномерного распределения температуры, будут зависеть от координаты x и времени t . При этом принимаем напряжения X_x , X_z и смещения v , w равными нулю. Тогда два уравнения движения упругой среды удовлетворяются тождественно и остаётся лишь одно уравнение

$$\frac{\partial X_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}. \quad (1)$$

Дифференцируя обе части ур. (1) по x и подставляя вместо производной её выражение через напряжения согласно обобщенного закона Гука, получим:

$$a^2 \frac{\partial^2 X_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 X_x}{\partial t^2} = s \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где $a = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ – скорость распространения упругой волны; λ и μ – постоянные Ламе; ρ – плотность; $s = \alpha(2\mu + 3\lambda)$ – постоянная, имеющая размерность напряжения; α – коэффициент линейного расширения.

Решим задачу о импульсном нагреве границы упругого полупространства, основываясь на ур. (2). Прежде всего, будем исходить из условия, что температура $T(x, t)$ полупространства удовлетворяет:

– уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (x \geq 0, t \geq 0); \quad (3)$$

– начальному условию

$$T(x, t)|_{t=0} = 0; \quad (4)$$

– граничному условию

$$T(x, t)|_{x=0} = T_0. \quad (5)$$

Тогда решение ур. (3) при условиях (4) и (5) в символах операционного исчисления будет иметь вид:

$$T^* = \frac{T_0}{p} \exp(-x \sqrt{\frac{p}{k}}), \quad (6)$$

где

$$T^*(x, p) = \int_0^{\infty} T(x, t) e^{-pt} dt. \quad (7)$$

Напряжение X_x , возникающее вследствие мгновенного нагрева, удовлетворяет:

– ур. (2);

– начальным условиям

$$X_x|_{t=0} = \frac{\partial X_x}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0; \quad (8)$$

– граничному условию

$$X_x|_{x=0} = 0; \quad (9)$$

– предельному условию, т.е. X_x остаётся конечным при $x \rightarrow \infty$.

В результате анализа полученного решения установлено, что до момента времени $t=x/a$ напряжение X_x растёт от 0 до некоторого отрицательного значения, величина которого всегда меньше, чем sT_0 . В момент времени $t=x/a$ (т.е., в тот момент времени, когда упругая волна, начавшая свое движение от границы полупространства в момент $t=0$, достигнет фиксированного сечения) напряжение X_x делает скачок на величину sT_0 в область положительных значений и затем быстро убывает до 0.

На рис. 3 представлена графическая зависимость изменения напряжения X_x с течением времени в сечении $\xi=1$.

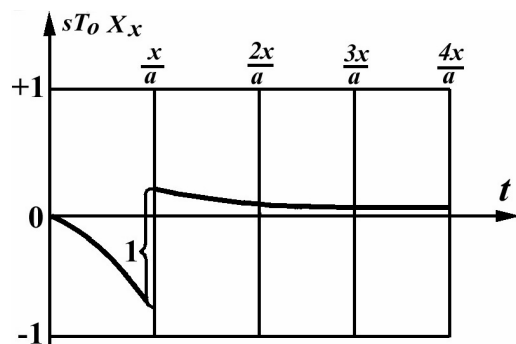


Рис. 3. Зависимость изменения напряжения X_x с течением времени в сечении $\xi=1$

Следовательно, при мгновенном (импульсном) нагреве границы упругой среды в ней возникают кратковременные растягивающие и сжимающие напряжения порядка sT_0 . Без учета инерционных членов в уравнениях движения упругой среды напряжения X_x были бы равными 0.

Схема непровара представлена на рис. 4.

См. рис. 3.5

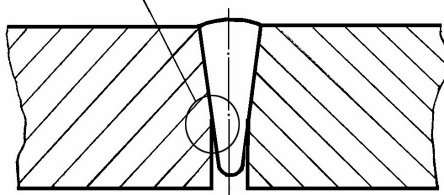


Рис. 4. Схема непровара

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трошенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Ч. 2. – Киев: Наукова думка, 1994. – 704 с.
2. Большова К.М. Магнитный метод определения предела усталости // Заводская лаборатория. – 1947. – № 1. – С. 58–64.

Следует отметить, что сварочный процесс представляет собой технологическую операцию, в результате которой реализуется атомарная связь на контактных поверхностях двух сварочных заготовок. В связи с этим на рис. 5 представлена сферолитная модель непровара, на которой наглядно представлено распределение сил межатомного взаимодействия. В частности, внутри кристалла каждый атом удерживается в своем положении силами связи, симметрично распределенными между окружающими его со всех сторон соседними атомами. На свободной поверхности кристалла, имеющейся в результате образования непровара, атом находится рядом с другими, лежащими с ним в одной плоскости и в плоскости, находящейся непосредственно ниже, однако над ним отсутствуют соседние атомы. Вследствие этого силы, удерживающие поверхностные атомы, несимметричны, и эти атомы не могут принять положения, соответствующего равновесному состоянию и наименьшей энергии кристалла.

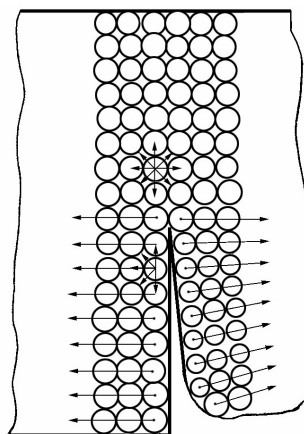


Рис. 5. Сферолитная модель непровара с распределением сил межатомного взаимодействия

Таким образом, структура кристалла на его свободной поверхности и непосредственно под ней оказывается искаженной. Локальное искажение является признаком запасенной энергии точно так же, как если бы подобные искажения возникли в результате действия внешней нагрузки. Такая форма энергии наблюдается на всех свободных поверхностях кристалла, поэтому её называют поверхностной энергией. Следовательно, силы межатомного взаимодействия атомов, находящихся на свободной поверхности кристаллов, неуравновешены, а сами атомы на поверхности непровара уже находятся в напряженном состоянии и, тем более, те, которые расположены в устье непровара.

3. Лебедев Г.А., Маринец Т.К., Ефремов А.И. Исследование циклической прочности металлов методом записи диаграмм усталости / Циклическая прочность металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 141–146.
4. Писаренко Г.С., Красовский А.Я., Йокобори Т. Экспериментальное изучение и анализ кинетики пластической зоны. – Киев, 1980. – 66 с. (Препр. АН Украины ИПП).

5. Голуб В.П. Циклическая ползучесть жаропрочных никелевых сплавов. — Киев: Наукова думка, 1983. — 224 с.
6. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник под ред. Г.С. Самойловича. — М.: Машиностроение, 1976. — 456 с.
7. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алёшин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. — М.: Высшая школа, 1991. — 283 с.
8. А.с. 567128 СССР. Способ контроля качества сварного соединения / В.М. Белов, Ю.И. Болотин. Бюлл. изобр., 1977, № 28.
9. Пат. 2212030 РФ. Способ обнаружения непровара / А.М. Апасов, А.А. Апасов. Бюлл. изобр., 2003, № 25. — С. 564.
10. Даниловская В.И. Температурные напряжения в упругом полупространстве, возникающие вследствие внезапного нагрева его границы // Прикладная математика и механика. — 1950. — Т. 14, вып. 3. — С. 316—318.

УДК 621.315.687.3:519.863

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫРАВНИВАЮЩЕГО КОНУСА КАБЕЛЬНОЙ ЗАДЕЛКИ

Г.М. Лебедев, Д.М. Мешков, Е.М. Мешков*

Кемеровский технологический институт пищевой промышленности

*Томский политехнический университет

E-mail: meshkov@tpu.ru

Рассмотрены вопросы моделирования электрического поля в трехмерном пространстве для трехжильных кабелей с металлической оболочкой напряжением 10 кВ. С целью уменьшения максимальной напряженности электрического поля в кабельных заделках предлагается использовать выравнивающий конус. Для оптимизации размеров выравнивающего конуса использованы методы планирования эксперимента и нелинейного программирования.

Опыт эксплуатации кабельных линий показывает, что электрическая прочность кабельной арматуры ниже прочности самих кабелей. К кабельной арматуре относят кабельные заделки и соединительные муфты. Заделки предназначены для соединения кабельной линии с электрическими аппаратами и электроустановками.

При разделке кабеля часть его оболочки (или экрана в случае экранированного кабеля) удаляют, что приводит к искажению силовых линий в геометрии кабеля и увеличению напряженности электрического поля (НЭП) в месте среза оболочки, которые проявляются в трех измерениях. Для уменьшения НЭП электрического поля в месте среза оболочки существует несколько методов. Наиболее простой из них разбортовка свинцовой (алюминевой) оболочки. Однако из-за неравномерности толщины металлической оболочки по диаметру, которая может привести к ее разрыву по краю, и из-за недостаточной величины радиуса отгибания, не всегда удается снизить НЭП до желаемых пределов.

Другим методом является применение полупроводящих покрытий по поверхности разряда между жилой и оболочкой кабеля. Снижение НЭП в месте обреза оболочки с применением полупроводящего покрытия связано с тем, что это покрытие предопределяет большие потери электрической энергии, что может привести к электротепловому пробую изоляции [1].

Наиболее распространенным способом снижения НЭП у обреза оболочки кабеля является продолжение металлизации до большего диаметра, т.е. использование выравнивающего конуса (ВК). Соответствующим профилированием экрана и применением различных изолирующих материалов мож-

но достичь равномерного распределения силовых линий электрического поля в кабельной заделке.

Электрическое поле в изоляции кабельной арматуры существенно отличается от поля в изоляции кабеля, где действует только его радиальная составляющая. В кабельной арматуре наряду с радиальной составляющей электрического поля действует тангенциальная составляющая. Регулирование радиальной составляющей цилиндрического поля в изоляции кабеля и кабельной арматуры, как правило, не вызывает трудностей. Регулирование тангенциальной составляющей является одной из основных проблем при конструировании кабельной арматуры.

Распределение НЭП в кабельной арматуре определить точным аналитическим расчетом невозможно, но эту задачу можно решить, применяя натурное моделирование или различные численные методы. Натурное моделирование имеет ряд существенных недостатков, описанных в [2]. С появлением современных ПЭВМ стало возможным решение подобных задач с использованием численных методов расчета. Для моделирования электромагнитных полей зачастую применяют метод конечных элементов. Одна из реализаций этого метода стала возможной с появлением программы FEM-LAB, предназначенной для решения широкого круга задач, формулируемых системами уравнений с частными производными. Особенностью программы является возможность решения трехмерных задач применительно к расчету электрических полей.

В системе FEMLAB дифференциальные уравнения в частных производных решаются проекционным методом Галёркина с конечными элементами [3]. Этот метод является одним из частных слу-