

## Анализ живучести магистрального нефтепровода в зоне стыкового сварного соединения

© А.М. Покровский, Е.И. Дубовицкий

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрена методика анализа живучести магистрального трубопровода в зоне поперечного сварного шва при эксплуатации с учетом остаточных сварочных напряжений. Расчет остаточных сварочных напряжений выполнен методом конечных элементов задачи термоупруговязкопластичности для материала с нестационарной структурой. Решение нелинейной нестационарной задачи теплопроводности проведено методом конечных разностей с использованием граничных условий третьего рода. Моделирование кинетики превращения аустенита в феррито-перлит и бейнит в неизотермических условиях при сварке осуществлено на основании теории изокинетических реакций. В основу расчета живучести положены критерий Ирвина и формула Пэриса.*

**Ключевые слова:** магистральный трубопровод, остаточные сварочные и эксплуатационные напряжения, метод конечных элементов, механика разрушения, оценка живучести

**Введение.** Магистральные нефтепроводы соединяют в единую систему посредством электродуговой сварки встык отдельных труб. Повреждение нефтепроводов происходит чаще всего вследствие разрушения поперечного сварного шва. Поэтому анализ живучести трубопровода в зоне сварного стыкового соединения — чрезвычайно актуальная задача, при решении которой основной проблемой является вычисление остаточных сварочных напряжений.

Остаточные сварочные напряжения можно определить экспериментальными методами [1, 2], для чего необходимо иметь уникальное дорогостоящее оборудование. Следует также учитывать, что выполнение таких работ — трудоемкий процесс. Поэтому удобнее применять численные методы расчета остаточных сварочных напряжений в деталях, например, с использованием стандартных конечно-элементных комплексов ANSYS [3] и ABAQUS [4]. Однако эти комплексы не позволяют учитывать изменение фазово-структурного состава, который оказывает существенное влияние на теплофизические и физико-механические свойства стали, что приводит к большой погрешности при вычислении остаточных сварочных напряжений. Отдельно следует отметить авторский конечно-элементный комплекс «Сварка» [5], в котором моделирование структурообразования ведется при наложении кривых охлаждения на термокинетические диаграммы превращений переохлажденного аустенита. Указанные особенности комплексов являются их недостатками. В настоящей статье

кинетика структурных превращений описывается по более точной методике, основанной на теории изокINETических реакций [6] с использованием информации, снятой с изотермических диаграмм (ИТД) превращений переохлажденного аустенита.

Основа расчета на живучесть — это кинетическая диаграмма усталостного разрушения. Для описания этой диаграммы применяют формулы Пэриса [7], Формана [8] и Коллприста [9]. Наибольшее распространение получила формула Пэриса, удовлетворительно описывающая линейный в логарифмических координатах участок кривой. В [10] рассмотрена живучесть линейной части нефтепровода с продольной полуэллиптической трещиной. Нагруженность определяли с помощью метода статистического моделирования Монте-Карло, применяя исторические данные. Для определения живучести использовали модель накопления повреждений [11]. Показано, что для рассматриваемого нефтепровода трещина глубиной 4 мм в основном металле может расти в течение 50 лет до появления течи, а при глубине 6 мм — в течение 8 лет. Метод, предложенный в настоящей статье, позволяет оценить живучесть линейной части трубопровода, но, к сожалению, неприменим для зоны сварного соединения, так как при расчете не учтены остаточные сварочные напряжения и переменный структурный состав, влияющий на значение трещиностойкости.

Цель настоящей статьи — разработать методику и программные средства для анализа живучести магистрального трубопровода в зоне сварного стыкового соединения с учетом остаточных сварочных напряжений.

**Постановка задачи.** Известно, что наиболее опасными остаточными сварочными напряжениями в трубопроводах являются окружные напряжения [12]. Максимальные эксплуатационные напряжения в тонкостенных трубах от внутреннего давления также окружные [13]. В связи с этим в настоящей работе рассмотрены продольные трещины, причем плоскости этих трещин и действия окружных напряжений совпадают. Вначале определяют суммарные напряжения от эксплуатации и сварки.

Следует отметить, что расчетное определение остаточных сварочных напряжений связано с некоторыми трудностями, так как процесс сварки характеризуется широким температурным диапазоном (от 20 до 2000 °С), в котором в стали происходят фазовые и структурные превращения, что существенно усложняет задачу вычисления остаточных напряжений. После сварки структурный состав стали по сечению трубы вблизи сварного шва изменяется, поэтому вязкость разрушения  $K_{Ic}$ , входящая в критерий Ирвина [14], тоже не постоянна по сечению трубы. Этот факт необходимо учитывать в расчетах для адекватной оценки живучести трубопровода.

В настоящей статье проведен расчет сварочных остаточных напряжений при электродуговой сварке встык двух труб толщиной 21,7 мм и внутренним диаметром 1420 мм, выполненных из стали 10Г2ФБ. Ширина сварочной ванны принималась равной 20 мм, толщина — равной толщине трубы, начальная температура сварочной ванны 2000 °С, что является средней температурой нагрева при электродуговой сварке. В начальный момент остывания температура трубы вне зоны шва принималась равной 20 °С.

Рассмотрим принцип расчета живучести трубопровода с полуэллиптической краевой продольной трещиной на внутренней поверхности трубы. На каждом цикле нагружения по аппроксимационным формулам вычисляется размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в точке, выходящей на поверхность, и в наиболее заглубленной точке. По формуле Пэриса вычисляется приращение длины и глубины трещины. При этом на каждом шаге проверяются два условия разрушения:

- 1) выполнение силового критерия Ирвина;
- 2) условие, при котором глубина трещины меньше толщины трубы.

При использовании критерия Ирвина максимальный КИН сравнивается с вязкостью разрушения  $K_{Ic}$ , зависящей от структурного состава.

**Методика расчета остаточных сварочных напряжений.** Моделирование формирования остаточных сварочных напряжений проводили численно с использованием шагового метода расчета. Для каждого шага по времени последовательно решали три задачи:

- 1) нелинейной нестационарной теплопроводности;
- 2) моделирования фазово-структурного состава;
- 3) вычисления напряжений.

Для изотропного тела в случае переменных теплофизических коэффициентов нелинейная нестационарная осесимметричная задача теплопроводности описывается следующим дифференциальным уравнением [15]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_V, \quad (1)$$

где  $c$  — коэффициент теплоемкости;  $\rho$  — плотность;  $T(r, z, \tau)$  — температура;  $\tau$  — время;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $q_V$  — мощность удельных источников энергоснабжения.

Для описания условий теплообмена использованы граничные условия третьего рода [15]:

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = h (T_c(\tau) - T_n(\tau)),$$

где  $n$  — нормаль к поверхности;  $h$  — суммарный коэффициент теплоотдачи, учитывающий теплообмен конвекцией и излучением;  $T_c$  — температура окружающей среды;  $T_n$  — температура поверхности.

Время охлаждения трубы более чем в 50 раз превышает время проварки шва, поэтому можно принять, что в начальный момент времени температура шва постоянна и составляет 2000 °С, температура свариваемой трубы 20 °С. При решении уравнения (1) использовали:

- 1) метод конечных разностей, обладающий лучшей сходимостью по сравнению с методом конечных элементов (МКЭ);
- 2) метод суммарной аппроксимации, при котором на основании экономичной схемы расщепления вместо двумерного уравнения применяли метод прогонки для двух одномерных уравнений.

Подробно описанный алгоритм расчета температурных полей в телах с прямоугольными границами методом конечных разностей изложен в [16].

Переход жидкой фазы в твердую в процессе кристаллизации при сварке моделировался с использованием диаграммы состояния сплавов железо — углерод [17]. Согласно этой диаграмме, при температуре выше температуры  $T_L$  ликвидуса сплав находится в жидком состоянии, при охлаждении до этой температуры появляются первые кристаллы, при температуре  $T_S$  солидуса металл полностью переходит в твердую фазу — аустенит. Удельная доля твердой фазы определялась исходя из условия  $V(T_L) = 0$ ,  $V(T_S) = 1$  по формуле правила отрезков [17]:

$$V = \frac{T_L - T}{T_L - T_S}, \quad (2)$$

где  $T$  — текущая температура.

Рассматриваемая трубная сталь 10Г2ФБ содержит 0,09 % углерода. По диаграмме состояния [17] для сплава с таким содержанием углерода  $T_L = 1535$  °С,  $T_S = 1500$  °С.

Тепловыделение при кристаллизации сплава учитывалось включением в уравнение теплопроводности мощности. При решении задачи шаговым методом для каждого узла конечно-разностной сетки определялась мощность удельных источников энергоснабжения на  $n$ -м шаге:

$$q_V^n = \rho L_{кр} \frac{\Delta V_n}{\Delta \tau_n},$$

$$\Delta V_n = V_n - V_{n-1}.$$

Здесь  $\rho$  — плотность сплава;  $L_{кр}$  — удельная теплота кристаллизации сплава;  $\Delta V_n$  — изменение удельной доли твердой фазы на  $n$ -м шаге по времени  $\Delta \tau_n$ .

Значения удельной доли твердой фазы на  $n$ -м и  $(n - 1)$ -м шагах можно определить по формуле (2), подставляя в нее температуру  $n$ -го и  $(n - 1)$ -го шага соответственно.

Значения удельной теплоты кристаллизации и превращений аустенита в феррито-перлит и бейнит принимались следующими [18]:  $L_{кр} = 250$  кДж/кг,  $L_{ф-п} = 66,7$  кДж/кг;  $L_{б} = 56,3$  кДж/кг и  $L_m = 31,3$  кДж/кг. Плотность сплава  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Перейдем к моделированию структурообразования в процессе сварки. Известно, что при нагреве выше температуры 740...760 °С происходит аустенизация стали [19]. При последующем охлаждении в зависимости от скорости охлаждения аустенит трубной стали 10Г2ФБ может превращаться в феррито-перлит, бейнит или мартенсит. Наилучшее согласование с экспериментом при сложных температурных режимах, характерных для сварки, достигается в случае прогнозирования структурных превращений по теории изокинетических реакций [6] с использованием изотермической диаграммы (ИТД) превращений переохлажденного аустенита. В расчете использовалась ИТД стали 10Г2ФБ, приведенная в работе [20].

Для описания изотермического распада аустенита в феррит и бейнит применяли уравнение Колмогорова — Аврами — Мейла [6]:

$$V_{ф-п(б)}(\tau) = 1 - \exp \left( -K_{ф-п(б)} \tau^{n_{ф-п(б)}} \right), \quad (3)$$

где  $V_{ф-п(б)}$  — удельная доля феррито-перлита (бейнита);  $K_{ф-п(б)}$ ,  $n_{ф-п(б)}$  — зависящие от температуры эмпирические коэффициенты, определяемые по ИТД, соответственно для феррито-перлитной и бейнитной областей.

Зная из ИТД стали для каждой температуры время  $\tau_n$  начала и  $\tau_k$  конца феррито-перлитного и бейнитного превращений, коэффициенты  $K_{ф-п(б)}$  и  $n_{ф-п(б)}$ , зависящие от температуры, можно определить по формулам [18]

$$n_{ф-п(б)}(T) = 2,66 / \lg \frac{\tau_k^{ф-п(б)}}{\tau_n^{ф-п(б)}};$$

$$K_{ф-п(б)}(T) = 0,0100 \tau_n^{n_{ф-п(б)}}.$$

Согласно методу наименьших квадратов, в ИТД стали 10Г2ФБ для феррито-перлитной и бейнитной областей использовали следующие выражения соответственно: