

УДК 621.791

Махненко О. В., Костеневич Е. С.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ЗОНЕ НАПЛАВКИ ПАТРУБКОВОЙ ЗОНЫ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Атомные энергетические реакторы типа ВВЭР-1000 широко используются в различных странах, в том числе в Украине работает 13 блоков. Корпус такого реактора изготовлен из толстостенных кованных обечаек из стали 15X2НМФА, которые соединяются сварными кольцевыми швами. Внутренняя поверхность наплавлена защитным антикоррозийным слоем из аустенитной стали. Опасным участком корпуса реактора с точки зрения сопротивления хрупкому разрушению является патрубковая зона в случае аварийной ситуации с заливанием через патрубки холодной борированной воды (термошок). При обосновании продления ресурса корпуса реактора необходимо учитывать остаточные напряжения, возникающие в результате технологических операций сварки и наплавки. Распределение остаточных напряжений в металле корпуса, выполненного из высокопрочной низколегированной стали бейнитного класса, зависит от микроструктурного состава и соответственно механических свойств в зоне плавления (ЗП) и термического влияния (ЗТВ).

В работах [1, 2] представлены полученные экспериментально дилатометрические кривые температурных деформаций и механических свойств корпусной стали при характерном сварочном термоцикле в ЗП и ЗТВ с учетом структурных превращений и соответствующие результаты расчета остаточных напряжений после проведения сварки и наплавки, или только наплавки корпуса реактора без моделирования кинетики структурных превращений. Такой подход упрощает расчетную модель определения напряженно-деформированного состояния (НДС) при сварке и наплавке, но может приводит к погрешностям из-за усреднения величин температурных деформаций и предела текучести материала в ЗП и ЗТВ.

Цель данной работы – создание математической модели для численного определения микроструктурного состава и механических свойств низколегированной корпусной стали в зоне наплавки защитного слоя патрубковой зоны корпуса реактора ВВЭР-1000.

Материалом патрубковой зоны корпуса реактора является сталь 15X2НМФА, материал аустенитной наплавки: первый слой – сварочная лента СВ-07X25Н13, второй слой – СВ-04X20Н10Г2Б. Дуговая наплавка осуществлялась лентой шириной 35-50 мм в два слоя общей толщиной 9 мм с предварительным подогревом до 100-150°C на следующих режимах: сила тока  $I=800-1000$  А, напряжение  $U=32-34$  В, скорость наплавки  $v_{св}=2$  мм/с.

Была решена температурная задача с пошаговым прослеживанием во времени в двухмерной постановке при допущении быстродвижущегося источника нагрева и осевой симметрии. Теплофизические свойства основного материала и материала наплавки патрубковой зоны задавались зависимыми от температуры [2, 3].

Погонная энергия наплавки, определенная расчетным путем, составляет  $q_n = 80405$  Дж/см. Распределение мощности источника в двухмерной цилиндрической системе координат описывается зависимостью:

$$W(r, z, t) = \frac{2q_n v_{св} \sqrt{K_r K_z}}{\pi} \exp \left\{ -K_r (D_r)^2 - K_z (D_z)^2 \right\} \quad (1)$$

$$D_z = z - z_o; D_r = r - r_o$$

где  $r, z$  – координаты (радиальная и осевая) рассматриваемой точки патрубка;  $r_o, z_o$  – координаты центра источника нагрева, изменяющиеся во времени;  $K_r, K_z$  – коэффициенты сосредоточенности удельного теплового потока;  $t$  – текущее время.

Мощность источника распределена как для поверхностного полосового источника, имитирующего дугу при наплавке ленточным электродом. При этом использовались следующие дополнительные условия:

$$\text{если } (z_0 - \frac{b}{2}) \leq z \leq (z_0 + \frac{b}{2}) \rightarrow D_z = z - z_0 = 0;$$

$$\text{если } z > (z_0 + \frac{b}{2}) \rightarrow D_z = z - z_0 - \frac{b}{2};$$

$$\text{если } z < (z_0 - \frac{b}{2}) \rightarrow D_z = z - z_0 + \frac{b}{2}.$$

Коэффициенты сосредоточенности  $K_r, K_z$  удельного теплового потока связаны с геометрическими размерами источника нагрева и наплавочного валика  $a = 4$  мм,  $b = 40$  мм (рис. 1).

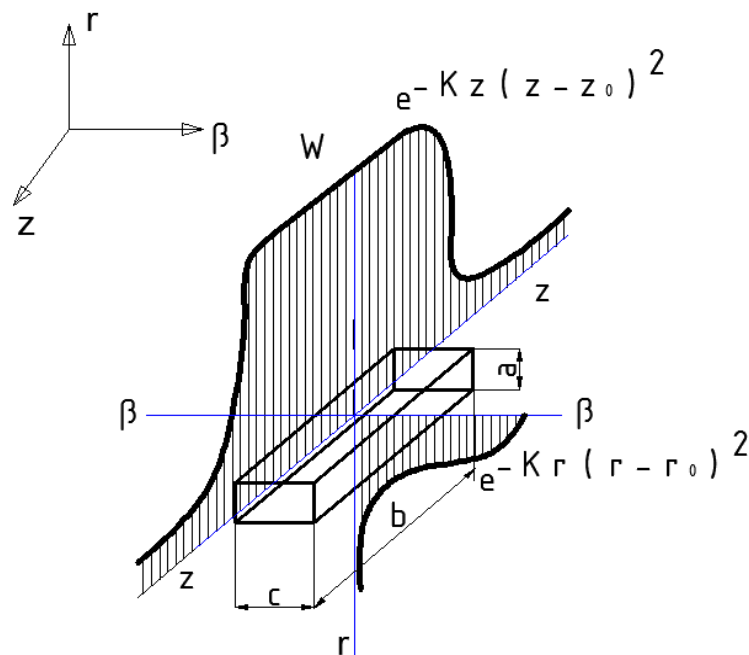


Рис.1. Распределение тепловой мощности источника в цилиндрической системе координат

На участках патрубка с радиусным переходом (рис. 2) траектория движения источника тепла учитывает поворот относительно центра радиусного перехода  $O_1$ , при этом параметры координат центра источника нагрева  $(r_0, z_0)$  записываются зависимостью:

$$\begin{cases} r_0 = R \cos \varphi + \Delta r \\ z_0 = R \sin \varphi + \Delta z \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол поворота источника нагрева, рад.

Положение источника тепла в конкретной точке выражаем через поворот координат относительно центра окружности  $O_1$ :

$$\begin{cases} (r - r_0)^* = (r - r_0) \cos \varphi + (z - z_0) \sin \varphi \\ (z - z_0)^* = -(r - r_0) \sin \varphi + (z - z_0) \cos \varphi \end{cases} \quad (3)$$

$$D_r = (r - r_0)^*; D_z = (z - z_0)^*;$$

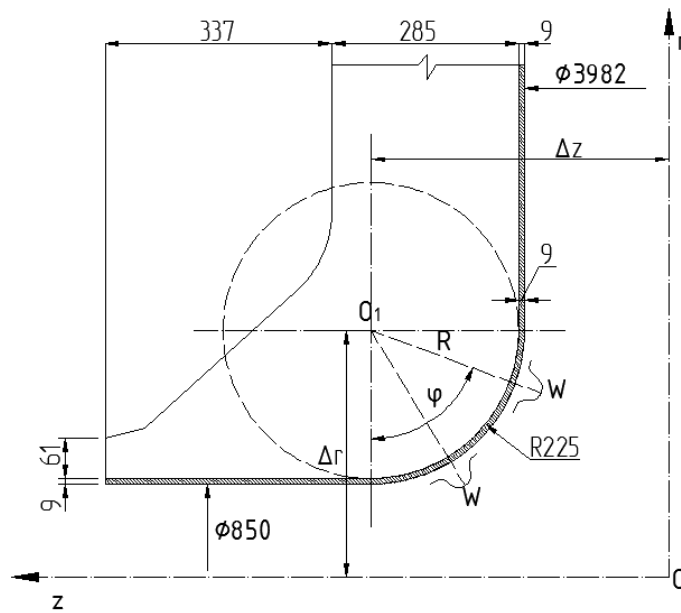


Рис. 2. Траектория движения источника тепла на участке патрубковой зоны с радиусным переходом

Характерными показателями являются размеры поперечного сечения наплавленного слоя, а также зоны термического влияния. Полученные расчетные данные позволяют оценить уровень максимальных температур (рис. 3), которые возникают в металле в процессе наплавки, и скорость охлаждения различных участков патрубковой зоны.

При нагреве и остывании металла в ЗП и ЗТВ протекают структурные превращения, в процессе которых выделяется скрытая теплота структурных переходов, происходят объемные изменения, обусловленные формированием другой кристаллической решетки, и вследствие этого меняются теплофизические и физико-механические свойства стали.

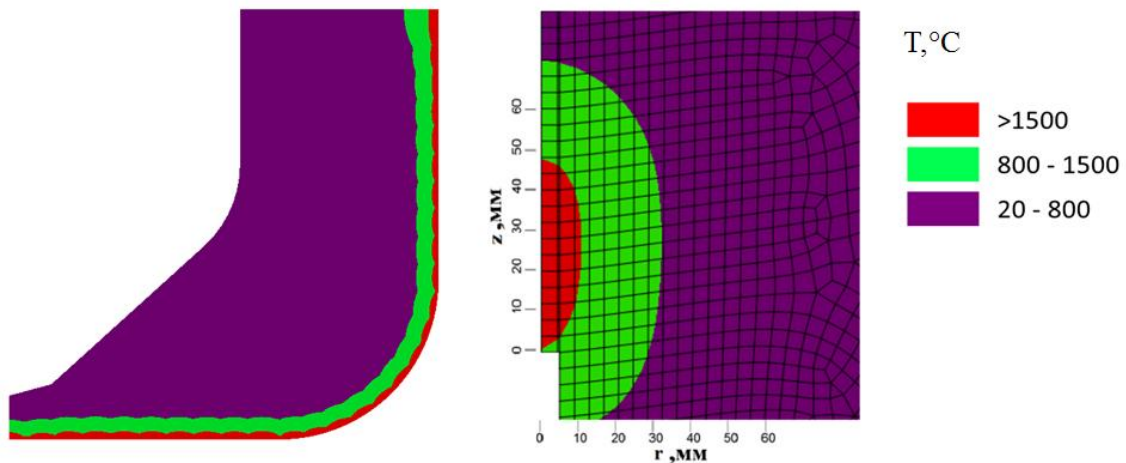


Рис. 2. Зона плавления и зона термического влияния при наплавке патрубковой зоны

Существует несколько моделей фазовых превращений, связанные с определением кинетики микроструктурных изменений в ЗП и ЗТВ в процессе нагрева и охлаждения. Так в соответствии с [4] при сварке сталей, склонных к закалке, микроструктурное состояние в любой точке ЗП и ЗТВ определяется в момент времени  $t$  величинами  $V_j(t)$ , где  $j = a$  соответствует аустениту,  $j = m$  – мартенситу,  $j = \phi$  – ферриту,  $j = \bar{b}$  – бейниту,  $j = \phi n$  – феррито-перлитной смеси. При этом  $\sum_j V_j(t) = 1$ .

Параметрические уравнения для расчета массовой доли каждой фазы (мартенсит, бейнит, феррито-перлит, аустенит) в конечной микроструктуре после охлаждения зависят от  $\Delta t_{8/5}$  – времени (с) охлаждения от температуры 800°C до 500°C:

$$V_m^{\max} = 0,5 \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{\ln \Delta t_{8/5} - \ln \Delta t_m^{50}}{\sqrt{2} \ln S_m} \right]; \quad (2)$$

$$V_{\phi n}^{\max} = 0,5 \left[ 1 + \operatorname{erf} \frac{\ln \Delta t_{8/5} - \ln \Delta t_{\phi n}^{50}}{\sqrt{2} \ln S_{\phi n}} \right]; \quad (3)$$

$$V_b^{\max} = \left[ 1 - V_m^{\max} - V_{\phi n}^{\max} \right] \quad (4)$$

$\Delta t_{8/5}$  – время (с) охлаждения от температуры 800°C до 500°C;

Величины  $\Delta t_m^{50}$ ,  $\Delta t_{\phi n}^{50}$ ,  $S_m$ ,  $S_{\phi n}$  определяются в зависимости от химического состава стали [5].

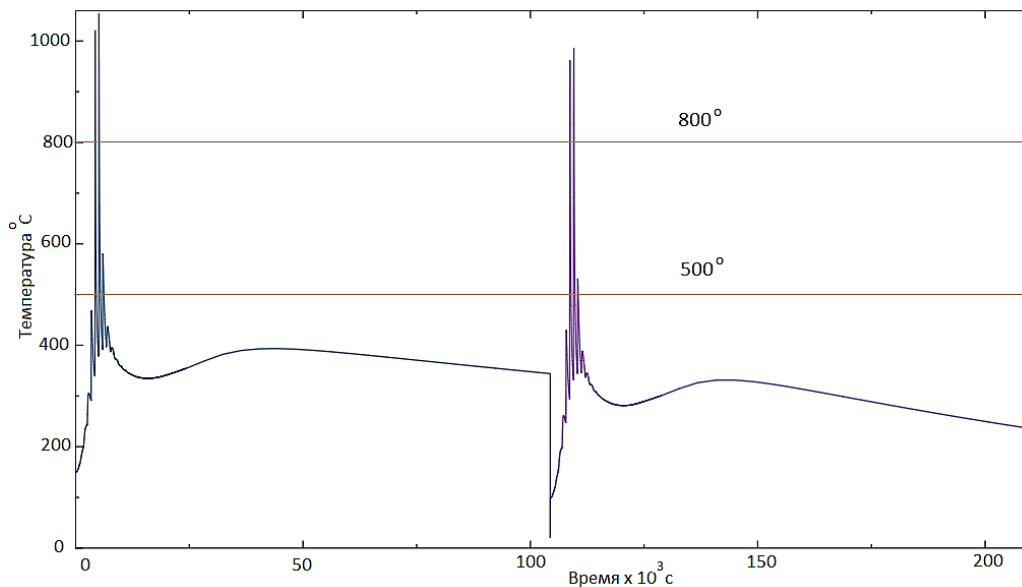


Рис. 3. Термический цикл в выбранной точке ЗТВ после двух слоев наплавки

Кинетика изменения величины  $V_j(T)$  в интервале температур от  $T_s^{(j)}$  – начало появления j-ой фазы к  $T_e^{(j)}$  – конец появления j-ой фазы при распаде аустенита определяется на основе соотношения:

$$V_j(T) = V_j^{\max} \left[ 1 - \exp \left( a_j \frac{T_s^{(j)} - T}{T_s^{(j)} - T_e^{(j)}} \right) \right] \quad a_j \approx -3, \quad (j = m, \phi n, b); \quad (5)$$

$$V_a(T) = 1 - \sum_{m, \phi n, b} V_j(T); \quad (6)$$

где  $V_a(T)$  – содержание остаточного аустенита при температуре  $T$ .

Начальная структура материала корпусной стали перед процессом аустенизации принимается:  $V_a = 0$ ,  $V_b = 0,6$ ,  $V_{\phi n} = 0,4$ ,  $V_m = 0,0$ . Полученные в процессе расчета нестационарные температурные поля и времена  $\Delta t_{8/5}$  дали возможность прогнозировать структурный состав материала в патрубковой зоне корпуса после наплавки.

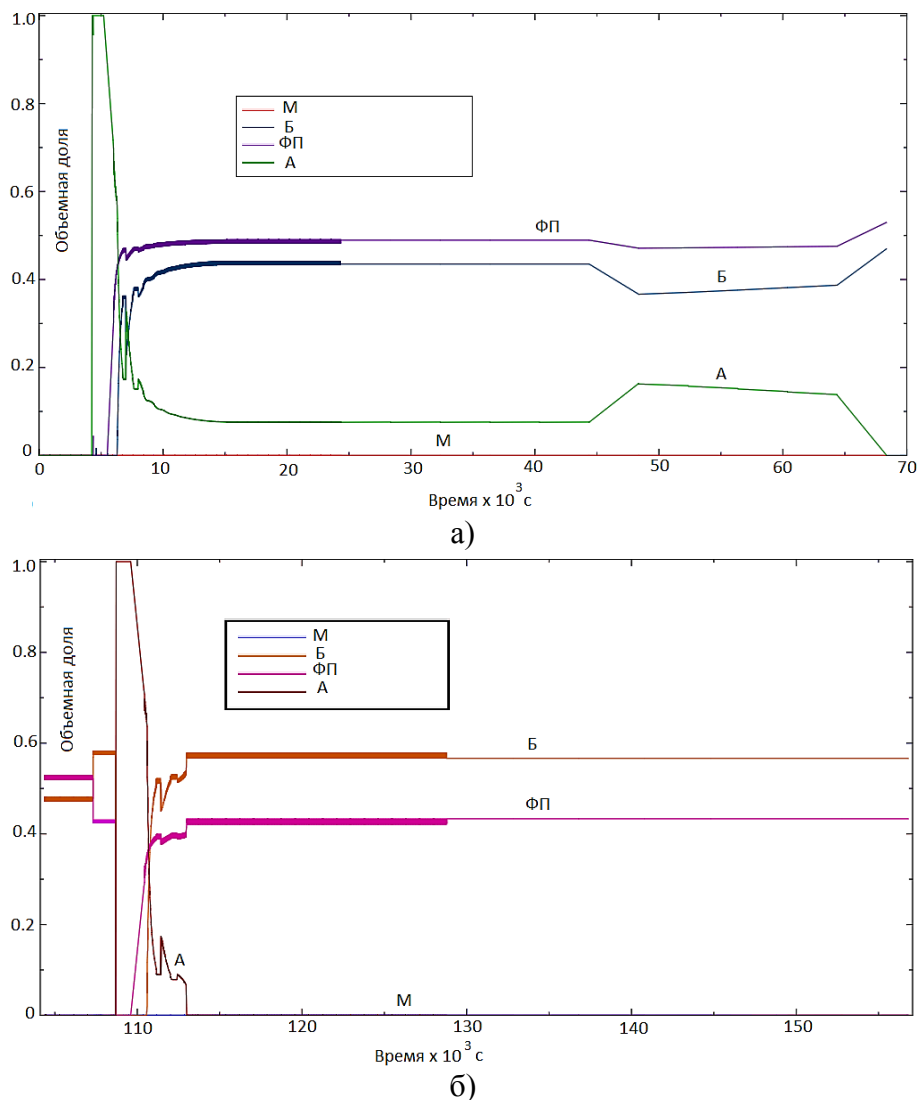


Рис. 4. Кинетика фазовых превращений в выбранной точке ЗТВ:  
 а) – после 1-ого слоя наплавки; б) – после 2-ого слоя наплавки

При заданных режимах наплавки и предварительного подогрева (100–150°C) низкие скорости охлаждения металла в зоне наплавочных валиков способствуют образованию преимущественно феррито-перлитной структуры (40–80%), бейнита (20–60%) после первого слоя наплавки. Второй слой наплавки не способствует заметному изменению структурного состава.

Расчетные данные относительно фазового состава стали 15X2НМФА были подтверждены работами [6, 7].

На основе вычисленных металлургических фаз и полей температур в зоне наплавки определяются такие входные данные для решения задачи напряженно-деформированного состояния патрубковой зоны, как объемные эффекты и механические свойства.

Предел текучести материала при температуре  $T$  с учетом микроструктурных изменений рассчитывается в виде:

$$\sigma_T(T) = \sum \sigma_j(T)V_j(T), \quad (j=m, \text{fn}, \text{б}), \quad (7)$$

Полученная по результатам расчета величина предела текучести (Рис.5) является различной: для участков ЗП и ЗТВ – 420–440 МПа, для основного металла за пределами ЗТВ, где не происходило структурных превращений – 480–500 МПа.

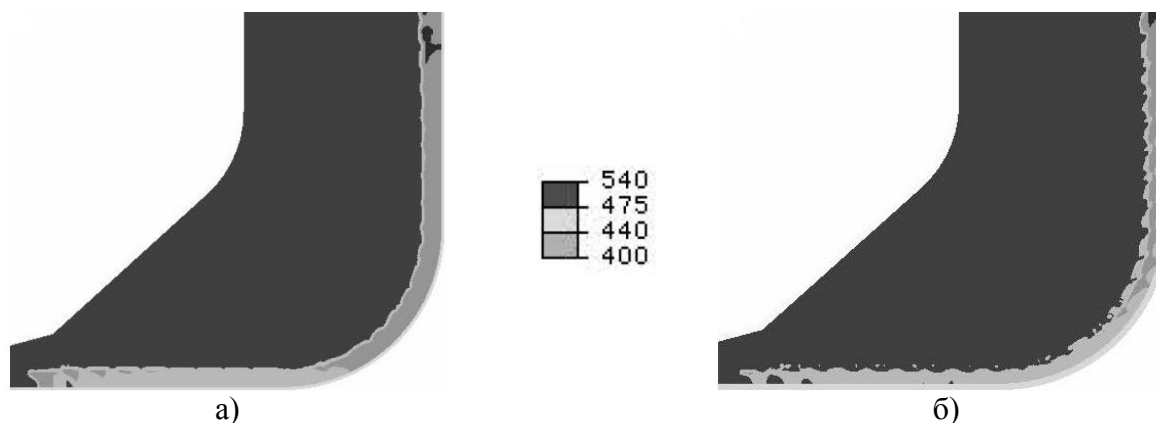


Рис. 5. Предел текучести  $\sigma_T$ , МПа в основном материале после наплавки:  
а) 1 слоя; б) 2 слоя

В результате технологической наследственности процесса дуговой наплавки защитного слоя величина предела текучести основного материала заметно снизилась, то есть изменились механические свойства материала, что нужно учитывать при расчете напряженно-деформированного состояния патрубковой зоны.

#### ВЫВОДЫ

Представленная модель распределения мощности движущегося источника нагрева, реализованная в сочетании с методом конечных элементов, позволила провести численное моделирование кинетики температур, микроструктурных фазовых превращений и распределения механических свойств (предела текучести) высокопрочной низколегированной стали 15Х2НМФА в зоне дуговой наплавки защитного антикоррозионного слоя патрубковой зоны корпуса реактора ВВЭР-1000.

Показано, что после наплавки в ЗП и ЗТВ образуется микроструктура с различным содержанием бейнита и феррито-перлита, что может приводить к существенной неоднородности механических свойств в основном материале. Разработанные математическая модель и программные средства могут быть применены для прогнозирования напряженно-деформированного состояния при наплавке патрубковой зоны.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марголин Б. З. Определение остаточных напряжений в корпусах реакторов ВВЭР после многопроходной сварки, наплавки и высокотемпературного отпуска / Б.З. Марголин, А.Я. Варовин, В.И. Костылев // Автоматическая сварка. 2005. – №10.
2. Kostylev V.I. Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels / V.I. Kostylev, B.Z. Margolin // International Journal of Pressure Vessels and Piping – 2000. – № 77.
3. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. А.С. Зубченко. 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
4. Numerical Methods for the Prediction of Welding Stress and Distortions / V.I.Makhnenko, E.A. Velikoivanenko, V.E.Pochinok, V.O. Makhnenko, G.Ph.Rozynka, N.I.Pivtorak // Welding and Surfacing Reviews. – 1999. – V.13, Part 1. – 146 p.
5. Касаткин О. Г. Расчетные модели для оценки механических свойств металла ЗТВ при сварке низколегированных сталей / О.Г.Касаткин, П.Зайффарт.
6. Гурович Б. А. Влияние химического состава и структурных параметров сталей корпусов реакторов ВВЭР на склонность к охрупчиванию, обусловленному образованием зернограницных сегрегаций, в том числе, в условиях, характерных для длительной эксплуатации энергетических установок / Б.А. Гурович, Е.А. Кулешова, С.В.Федотова. – ИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия.
7. Гурович Б. А. Структурные исследования сталей корпусов реакторов для нового поколения реакторов типа ВВЭР / Б.А. Гурович, Е.А. Кулешова, С.В.Федотова. – ИИЦ «Курчатовский институт», Москва, ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.