

УДК 621.791

Махненко О. В., Костеневич Е. С.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Украина, г. Киев

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

*В настоящей работе разработана математическая модель, описывающая температурные поля и изменение микроструктурного состава в материале патрубковой зоны корпуса реактора ВВЭР-1000 в процессе наплавки антикоррозионного слоя. В основу решения нестационарной задачи теплопроводности положен метод конечных элементов. Для описания теплообмена использованы граничные условия конвективного теплообмена. Моделирование превращения аустенита в феррито-перлит и бейнит произведено на основе диаграммы АРА. Показано, что после наплавки в основном материале образуется микроструктура с различным содержанием бейнита и феррито-перлита. Наплавленный антикоррозионный слой имеет аустенитную структуру. Разработанные математическая модель и программные средства могут быть применены для прогнозирования напряженно-деформированного состояния и прочности патрубковой зоны корпуса реактора ВВЭР-1000 при различных режимах эксплуатации с учетом технологической наследственности после проведения наплавки.*

Ключевые слова: реактор ВВЭР-1000; патрубковая зона; антикоррозионная наплавка; источник тепла; структурные превращения; диаграмма АРА; математическое моделирование.

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 15Х2НМФА, которые соединяются сварными кольцевыми швами. Внутренняя поверхность наплавлена защитным антикоррозионным 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 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 термочикле 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 приводить 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 кинетики микроструктурных превращений и механических свойств низколегированной корпусной стали в зоне наплавки защитного слоя патрубковой зоны корпуса реактора ВВЭР-1000.

Материалом патрубковой зоны корпуса реактора является сталь 15Х2НМФА, материал аустенитной наплавки: первый слой – сварочная лента СВ-07Х25Н13, второй слой – СВ-04Х20Н10Г2Б. Дуговая наплавка осуществлялась лентой шириной 35–50 мм в два слоя общей толщиной 9 мм с предварительным подогревом до 100–150 °С на следующих режимах: сила тока  $I = 800–1000$  А, напряжение  $U = 32–34$  В, скорость наплавки  $v_{св} = 2$  мм/с.

Была решена задача теплопроводности с пошаговым прослеживанием во времени в двумерной постановке при допущении быстродвижущегося источника нагрева и осевой симметрии. Теплофизические свойства основного материала и материала наплавки патрубковой зоны задавались зависимыми от температуры.

Распределение мощности источника в двумерной цилиндрической системе координат описывается зависимостью:

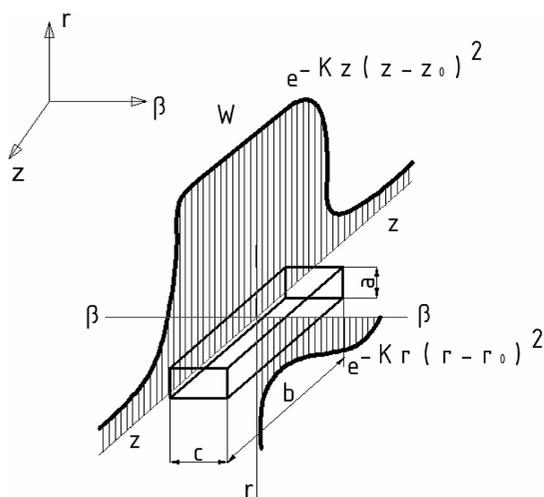


Рис. 1. Распределение тепловой мощности полосового источника в цилиндрической системе координат

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

$$D_z = z - z_0, \quad D_r = r - r_0$$

где  $r, z$  – координаты (радиальная и осевая) рассматриваемой точки патрубка;  $r_0, z_0$  – координаты центра источника нагрева для каждого прохода наплавки;  $K_r, K_z$  – коэффициенты сосредоточенности удельного теплового потока;  $t$  – текущее время.

Мощность нагрева распределена как для полосового источника, имитирующего дугу при наплавке ленточным электродом:

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

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

Коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока «К» связан с геометрическими размерами наплавочного валика: толщина  $a = 4$  мм, ширина  $b = 40$  мм.

Полученные расчетные данные позволяют оценить уровень максимальных температур (Рис. 2), которые возникают в металле в процессе наплавки, и скорость охлаждения различных участков патрубковой зоны. Характерными показателями являются размеры поперечного сечения ЗП и ЗТВ.

При нагреве и остывании наплавленного металла в зоне термического влияния и зоне плавления протекают структурные превращения, в процессе которых выделяется скрытая теплота структурных переходов, происходят объемные изменения, обусловленные формированием другой кристаллической решетки, вследствие чего меняются теплофизические и физико-механические свойства стали.

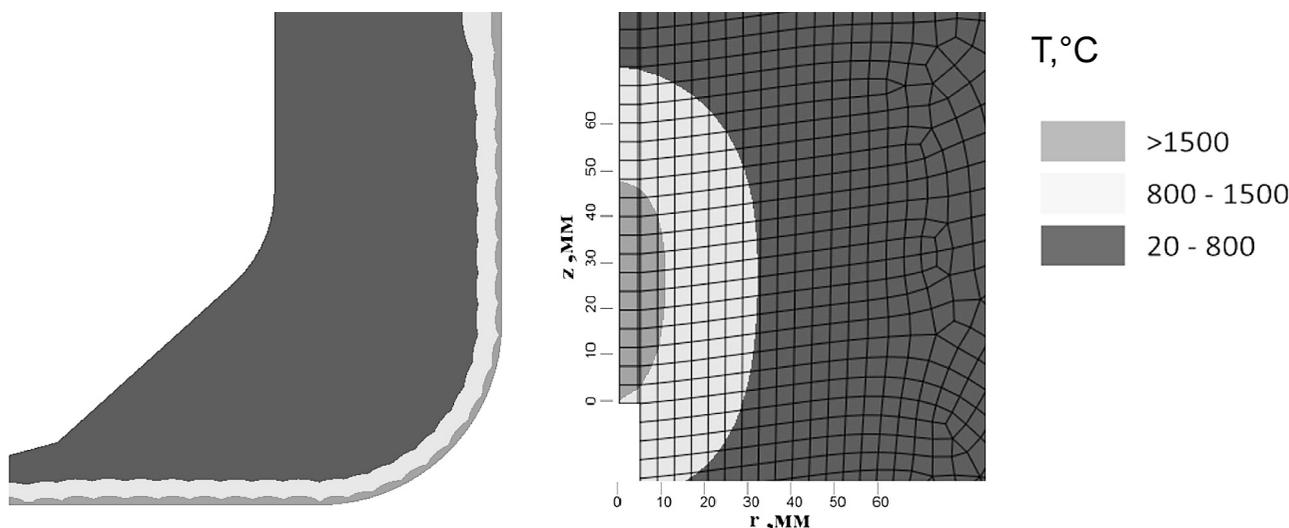


Рис. 2. ЗП и ЗТВ при наплавке патрубковой зоны

Существует несколько моделей фазовых превращений, связанные с определением кинетики микроструктурных изменений в ЗП и ЗТВ в процессе нагрева и охлаждения. Так в соответствии с [3] при сварке сталей, склонных к закалке, микроструктурное состояние в любой точке ЗП и ЗТВ определяется в момент времени  $t$  величинами массовой доли каждой фазы  $V_j(t)$ , где  $j = a$  соответствует аустениту,  $j = m$  – мартенситу,  $j = \phi$  – ферриту,  $j = б$  – бейниту,  $j = \text{фп}$  – феррито-перлитной смеси. При этом  $\sum_j V_j(t) = 1$ .

Параметрические уравнения для расчета массовой доли каждой фазы в конечной микроструктуре после охлаждения зависят от  $\Delta t_{8/5}$  – времени (с) охлаждения от температуры 800 °С до 500 °С:

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

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

$$V_б^{\max} = 1 - V_m^{\max} - V_{\text{фп}}^{\max}; \quad (4)$$

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

Величины  $\Delta t_m^{50}$ ,  $\Delta t_{\text{фп}}^{50}$ ,  $\Delta t_б^{50}$ ,  $S_m$ ,  $S_{\text{фп}}$ ,  $S_б$  могут определяться в зависимости от химического состава стали либо по диаграмме АРА, либо по существующим регрессионным уравнениям [4 и др.].

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:

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

$$V_a(T) = 1 - \sum_{m, \phi, б, п} V_j(T); a_j \approx -3, \quad (6)$$

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

Начальная структура материала корпусной стали принимается:  $V_a = 0$ ,  $V_б = 0,6$ ,  $V_{\text{фп}} = 0,4$ ,  $V_m = 0,0$ . При заданных режимах наплавки и предварительного подогрева (100–150 °С) низкие скорости охлаждения металла в зоне наплавочных валиков способствуют образованию преимущественно феррито-перлитной структуры ( $V_{\text{фп}} = 0,40–0,80$ , бейнита  $V_б = 0,2–0,6$ ).

Расчетные данные относительно фазового состава стали 15X2НМФА были подтверждены работами [5, 6].

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

$$\sigma_T(T) = \sum \sigma_j(T) V_j(T), (j = m, \phi, б, п), \quad (7)$$

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

### 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 15X2НМФА в зоне дуговой наплавки защитного антикоррозионного слоя патрубковой зоны корпуса реактора ВВЭР-1000.

Определено, что после наплавки в ЗП и ЗТВ образуется микроструктура с различным содержанием бейнита и феррито-перлита, что может приводить к неоднородности механических свойств и температурных деформаций в основном материале. Результаты прогнозирования фазового микроструктурного состава сильно зависят от точности определения температурных циклов нагрева-охлаждения в различных точках ЗП и ЗТВ, что требует адекватного задания в модели условий обеспечения предварительного и сопутствующего подогрева.

Разработанные математическая модель и программные средства могут быть применены для прогнозирования НДС при наплавке патрубковой зоны.

### Литература

- [1] Б.З. Марголин, А.Я. Варовин, В.И. Костылев. Определение остаточных напряжений в корпусах реакторов ВВЭР после многопроходной сварки, наплавки и высокотемпературного отпуска. Автоматическая сварка, №10 2005.
- [2] V.I. Kostylev, B.Z. Margolin Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels. International Journal of Pressure Vessels and Piping 77 (2000)
- [3] V.I.Makhnenko, E.A. Velikoivanenko, V.E.Pochinok, V.O. Makhnenko, G.Ph.Rozynka, N.I.Pivtorak. Numerical Methods for the Prediction of Welding Stress and Distortions // Welding and Surfacing Reviews. – 1999. – V.13, Part 1. – 146 p.
- [4] О.Г.Касаткин, П.Зайффарт Расчетные модели для оценки механических свойств металла ЗТВ при

сварке низколегированных сталей. Сборник трудов международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». К.:2002

- [5] Б.А. Гурович, Е.А. Кулешова, С.В.Федотова 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. ИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

- [6] Б.А. Гурович, Е.А. Кулешова, А.С.Фролов Структурные исследования сталей корпусов реакторов для нового поколения реакторов типа ВВЭР. ИИЦ «Курчатовский институт», Москва, ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия

*Makhnenko O. V., Kostenevich E. S.*

E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

#### MATHEMATICAL SIMULATION OF PHASE TRANSFORMATIONS IN CLADDING ZONE OF THE INLET NOZZLE OF THE REACTOR VESSEL VVER-1000

*In the present work is developed mathematical model that describes the temperature fields and the microstructural composition change in the material of the reactor vessel nozzle zone VVER-1000 during the corrosion-resistant cladding. The basis of the solution of non-stationary heat conduction problem is finite element method. To describe the boundary conditions used convective heat transfer conditions. Modeling the transformation of austenite to ferrite-pearlite and bainite produced by ARA diagram parameters. It was shown that after cladding in the base material formed microstructure with different content of bainite and ferrite-pearlite. Cladding corrosion-resistant layer has the austenitic structure. The developed mathematical model and software can be used to predict the stress-strain state and strength of the nozzle zone VVER-1000 for different operating conditions considering technological heredity after cladding.*

*Keywords:* reactor VVER-1000; nozzle zone; corrosion-resistant cladding; heat source; phase transformation; diagram ARA; mathematical simulation.

#### References

- [1] B.Z. Margolin, A.Ja. Varovin, V.I. Kostylev. Determination of residual stress caused by multipass welding, cladding and tempering of reactor pressure vessels. The Paton Welding Journal, №10 2005.
- [2] V.I. Kostylev, B.Z. Margolin Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels. International Journal of Pressure Vessels and Piping 77 (2000)
- [3] V.I.Makhnenko, E.A. Velikoivanenko, V.E.Pochinok, V.O. Makhnenko, G.Ph.Rozynka, N.I.Pivtorak. Numerical Methods for the Prediction of Welding Stress and Distortions // Welding and Surfacing Reviews. – 1999. – V.13, Part 1. – 146 p.
- [4] Seyffarth P., Kasatkin O. G. Calculation models for evaluating mechanical properties of HAZ metal in welding low-alloyed steels. Proceedings of International Conference «Mathematical modeling and information technologies in welding and related processes. K.:2002
- [5] B.A. Gurovich, E.A. Kuleshova, S.V.Fedotova Influence of structure and structural parameters of VVER-1000 RPV steels on the tendency to embrittlement caused by grain boundary segregation under long-term operation of power plants. Kurchatov Institute, Moscow, Russian
- [6] B.A. Gurovich, E.A. Kuleshova, A.S. Frolov, Kurcatov Institute, Moscow, ОКБ «Гидропресс», Podolsk, Russian Structural researches of vessel steels of new generation reactors of WVER-type.