

УДК 621.791

О. В. Махненко\*, О. С. Костеневич

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСТРУКТУРНИХ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАЛЬНОГО НАГРІВУ НА ПРИКЛАДІ НАПЛАВЛЕННЯ ЗАХИСНОГО ШАРУ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

За допомогою розроблених скінченно-елементних моделей чисельно досліджено нестационарні температурні поля і кінетику мікроструктурних фазових перетворень в основному матеріалі корпусу реактора ВВЕР-1000 (сталь 15Х2НМФА) за дугового наплавлення під флюсом захисного антикорозійного шару із аустенітного матеріалу. Виконано порівняльний аналіз результатів моделювання мікроструктурних фазових перетворень за двома методами прогнозування розпаду аустеніту під час охолодження. Перший метод заснований на застосуванні регресійних рівнянь і характерного часу охолодження  $\Delta t_{8/5}$ . Другий – на діаграмах ізотермічного розпаду аустеніту і рівняннях Аврамі та Койстінена–Марбургера. В результаті моделювання мікроструктурних перетворень за наплавлення отримано бейнітно-мартенситний склад у зоні термічного впливу основного матеріалу корпусу реактора, що підтверджують результати дилатометричного аналізу та металографії.

**Ключові слова:** реактор ВВЕР-1000, антикорозійне наплавлення, діаграма АРА, мікроструктурні фазові перетворення, кінетика перетворень, рівняння Аврамі.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ СВАРОЧНОМ НАГРЕВЕ НА ПРИМЕРЕ НАПЛАВКИ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-1000

С помощью разработанных конечно-элементных моделей численно исследованы нестационарные температурные поля и кинетика микроструктурных фазовых превращений в основном материале корпуса реактора ВВЭР-1000 (сталь 15Х2НМФА) при дуговой наплавке под флюсом защитного антикоррозионного слоя из аустенитного материала. Осуществлен сравнительный анализ результатов моделирования микроструктурных фазовых превращений по двум методам прогнозирования распада аустенита при охлаждении. Первый метод основан на применении регрессионных уравнений и характерного времени охлаждения  $\Delta t_{8/5}$ ; второй – на диаграммах изотермического распада аустенита и уравнениях Аврамы и Коистинена–Марбургера. В результате моделирования микроструктурных превращений при наплавке получен бейнитно-мартенситный состав в зоне термического влияния основного материала корпуса реактора, что подтверждено результатами дилатометрического анализа и металлографии.

**Ключевые слова:** реактор ВВЭР-1000, антикоррозионная наплавка, диаграмма АРА, микроструктурные фазовые превращения, кинетика превращений, уравнение Аврамы.

### MATHEMATICAL SIMULATION OF MICROSTRUCTURAL PHASE TRANSFORMATIONS AT WELDING HEATING BY EXAMPLE OF CLADDING OF PROTECTION LAYER OF THE REACTOR VESSEL VVER-1000

Using the developed finite element models the numerical research of unsteady temperature fields and kinetics of microstructural phase transformations in the base 2.5Cr–Mo–V steel (15H2NMFA) of the reactor vessel VVER-1000 at arc cladding of the protective anticorrosion layer made of austenite under flux were simulated. A comparative analysis of the results of simulation of microstructural phase transformations using two methods for predicting the decomposition of austenite during cooling was done. The first method is based on the application of regression equations and the characteristic cooling time  $\Delta t_{8/5}$ , and the second on diagrams of isothermal decomposition of austenite and the Avrami and Koistinen–Marburger equations. As a result of modeling of the microstructural transformations during cladding, the bainite-martensitic composition of the base material of the reactor vessel was obtained. These results were confirmed experimentally using dilatometric analysis and metallography.

**Key words:** reactor pressure vessel VVER-1000, anticorrosion cladding, CCT diagram, microstructural phase transformations, transformation kinetics, Avrami equation.