

Neutron diagnostics of nuclear reactor surveillance specimens

Control of the condition of the metal of the reactor pressure vessel (RPV) during its service life and ensuring the RPV integrity under normal operating conditions, as well as in any design accidents, is one of the vital problems of modern nuclear power engineering. This is a prerequisite for the safe operation of shell-type nuclear reactors. During operation of the reactor, RPVs are exposed to intense neutron irradiation, which results in the deterioration of reactor vessel steel and severe changes in its physical and mechanical properties manifested mainly in increased brittleness (Fig. 1). Therefore, to control the condition of the RPV metal, reference surveillance

specimens are used, which are installed in a special container next to RPV and are made of the same material. At certain intervals, surveillance specimens are removed from the reactor shaft and subjected to mechanical Charpy impact tests to assess the actual state (brittle or ductile) of the RPV metal.

However, containers usually contain a limited number of surveillance specimens. Therefore, instead of disposing of the tested material, the surveillance specimens are recovered using various welding techniques and returned to the reactor for further irradiation. This makes it possible to increase the number of irradiated RPV steel samples to ob-

Fig. 1. a) Fuel loading at power unit №3 of the Rostov NPP. Source: <https://sdelanounas.ru/blogs/55098/>. b) Surveillance specimens installed in the reactor of power unit №4 of the Rostov NPP. Source: <http://www.atominform.ru/news/w0801.htm>. c) Opened container with surveillance specimens for VVER-1000 reactor (NPP Temelin, Czech Republic). Source: <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.20/27086/D02-5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>



Рис. 1. а) Загрузка топлива на энергоблоке №3 Ростовской АЭС. Источник: <https://sdelanounas.ru/blogs/55098/>. б) Образцы-свидетели, установленные в реактор пускового энергоблока №4 Ростовской АЭС. Источник: <http://www.atominform.ru/news/w0801.htm>. в) Открытый контейнер с образцами-свидетелями для реактора ВВЭР-1000 (АЭС Темелин, Чехия). Источник: <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.20/27086/D02-5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Нейтронная диагностика образцов-свидетелей ядерных реакторов

Одной из актуальных проблем современной атомной энергетики является контроль состояния металла корпуса ядерного реактора в течение всего срока службы и обеспечение его целостности в нормальных условиях эксплуатации, а также при любых проектных авариях. Это необходимое условие безопасной эксплуатации ядерной энергетической установки с реактором корпусного типа. Во время работы корпус реактора подвергается интенсивному нейтронному облучению, что приводит к деградации корпусной стали и серьезным изменениям ее физико-механических свойств, проявляющимся, главным образом, в повышенной хрупкости (Рис 1). Поэтому для мониторинга состояния металла корпуса реактора используются контрольные об-

разцы-свидетели, которые устанавливаются в специальном контейнере рядом с корпусом реактора и изготовлены из того же материала, что и корпус реактора. С определенной периодичностью образцы-свидетели извлекаются из шахты реактора и подвергаются механическим испытаниям на ударную вязкость по методу Шарпи для оценки реального состояния (хрупкого или пластичного) металла корпуса реактора.

Однако контейнеры обычно содержат ограниченное количество образцов-свидетелей. Поэтому, вместо того, чтобы утилизировать испытанные материалы, образцы-свидетели восстанавливают с помощью различных методов сварки и возвращают в реактор для дальнейшего облучения. Это позволяет увеличить коли-

tain representative and reliable data that are used to assess the radiation embrittlement of the RPV material to confirm or extend its service life.

In order to maintain the representativeness of the data, the reconstitution procedure by welding should not significantly modify the structure and mechanical properties of the material of the surveillance specimens. Nevertheless, each thermal cycle of the welding process leads to the formation of residual stresses due to the fact that almost all welding methods are based on the use of highly localized energy sources to melt the material in the weld. As a result, significant residual stresses arise in the material, the level of which is determined by the parameters of the welding process and which can significantly affect the results of mechanical tests.

Therefore, it is necessary to control the level of residual stresses after welding in the reconstituted surveillance specimens.

A team of researchers from the Institute of Electronics of the BAN (Sofia, Bulgaria) and FLNP JINR performed experiments on the study of residual stresses and microstrains using neutron diffraction in non-irradiated surveillance specimens reconstituted using various welding methods (electron beam, laser and arc welding) (Fig. 2) [1]. Due to the high penetrating power of neutrons, estimates of residual stresses, microstrains, dislocation density, and crystallite sizes were obtained, which change greatly in the region of welds compared to the original material, which has a significant effect on the change in the yield strength of the material [2].

Fig. 2. a) Layout of the experiment on the study of residual stresses in a bulk object using neutron diffraction. b) Investigated surveillance specimens reconstituted using various welding techniques. c) Dislocation density distributions in the investigated surveillance specimens when scanning across the welds.

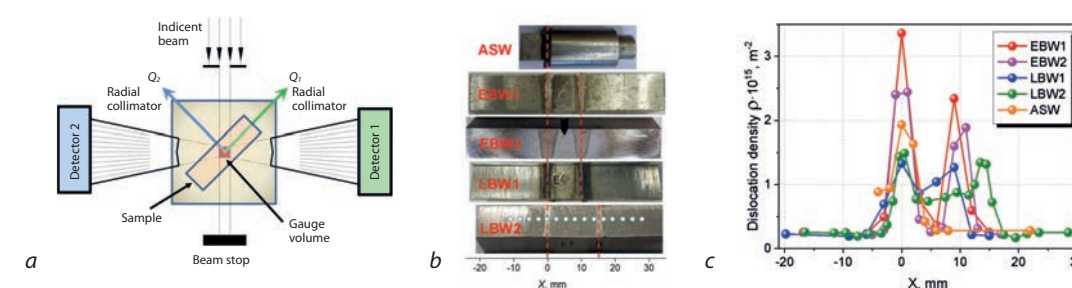


Рис. 2. а) Схема эксперимента по исследованию остаточных напряжений в массивном объекте с помощью дифракции нейтронов. б) Исследованные образцы-свидетели, восстановленные с помощью различных методов сварки. в) Распределения плотности дислокаций в исследованных образцах-свидетелях при сканировании поперек сварных швов.

чество облученных образцов стали корпуса реактора для получения репрезентативных и надежных данных, которые используются для оценки радиационного охрупчивания материала корпуса реактора для подтверждения или продления срока его эксплуатации.

Чтобы сохранить репрезентативность данных, процедура восстановления методом сварки не должна существенно изменять структуру и механические свойства материала образцов-свидетелей. Тем не менее, каждый тепловой цикл процесса сварки приводит к образованию остаточных напряжений из-за того, что практически все методы сварки основаны на использовании сильно локализованных источников энергии для расплавления материала в сварном шве. Вследствие этого в материале возникают значительные остаточные напряжения, уровень которых определяется параметрами сварочного процесса и которые могут существенно влиять на ре-

зультаты механических тестов. Поэтому необходимо контролировать уровень остаточных напряжений после сварки в реконструированных образцах-свидетелях.

Группа исследователей из Института электроники БАН (София, Болгария) и ЛНФ ОИЯИ провела эксперименты по изучению остаточных напряжений и микродеформаций с помощью дифракции нейтронов в необлученных образцах-свидетелях, восстановленных с помощью различных методов сварки (электроннолучевой, лазерной и дуговой) (Рис. 2) [1]. Благодаря высокой проникающей способности нейтронов получены оценки величины остаточных напряжений, микродеформаций, плотности дислокаций и размеров кристаллитов, которые сильно изменяются в области сварных швов по сравнению с исходным материалом, что оказывает значительное влияние на изменение предела текучести материала [2].