

с высокими механическими свойствами устойчивость сварных соединений против образования трещин в процессе сварки и термообработки. Представляет интерес новая технология газозлектрической сварки в щелевую разделку толстостенных сосудов, которая является весьма перспективной для применения взамен сварки под флюсом. Одной из перспективных является электронно-лучевая сварка. Успешное внедрение на турбостроительных заводах позволило накопить необходимый опыт для начала промышленных работ, связанных с ее освоением при изготовлении оборудования АЭС. Промышленное применение процесса позволяет увеличить производительность сварки толстостенных изделий в 10—15 раз, снизить расход на сварочные и конструкционные материалы, электроэнергию, механизировать и автоматизировать процесс, существенно оздоровить условия труда сварщиков.

Разработана аустенитная сталь для электродной ленты, предназначенной для однопроходной наплавки или выполнения первого слоя двухслойной антикоррозионной облицовки внутренних поверхностей корпусов ВВЭР, изучены варианты технологии однопроходной и двухпроходной наплавки, обеспечивающие требуемый комплекс свойств при наплавке корпусных узлов. Для повышения производительности процесса антикоррозионной наплавки разработаны и проходят опытно-промышленное опробование образцы нового наплавочного оборудования.

Значительный интерес представляет использование в атомном машиностроении стали, плакированной взрывом. Разработана и внедрена технология непосредственного плакирования взрывом поковок, отливок и толстых листов (без последующей прокатки). Технология прошла опытно-промышленную проверку. В настоящее время разрабатывается цеховая технология плакирования, включающая создание и всестороннее исследование опытной взрывной камеры.

Вопросы поверхностной защиты оборудования АЭС методом химико-термической обработки деталей быстрых реакторов от задириания и самосваривания, закалка

крупных поковок энергетического оборудования, образование трещин при термической обработке после сварки и наплавки корпусов, перспективы использования специальных покрытий для предотвращения окисления изделий ядерных и тепловых энергетических установок при их термической обработке также нашли отражение в выступлениях участников совещания.

Весьма интересны доклады, в которых приводятся подробные данные о материалах, технологии и оборудовании при производстве трубопроводов АЭС, зональном электроподогреве под сварку и термообработке сварных соединений, механической обработке крупного оборудования.

Часть докладов посвящена разработке технологии изготовления тонкостенных прецизионных труб. Большая группа докладов освещает вопросы, связанные с автоматизацией неразрушающего контроля заготовок и сварных соединений и с прочностными испытаниями материалов, применяемых для изготовления оборудования АЭС. Были также представлены доклады, посвященные теоретическому и экспериментальному исследованию напряженного состояния конструкций ядерных энергоустановок.

В решении совещания отражены пути развития новых материалов и прогрессивной технологии при производстве оборудования АЭС и ТЭС, механизация и автоматизация производственных процессов, повышение качества продукции и производительности труда, мероприятия по экономии металла.

Выполнение поставленных задач потребует больших творческих усилий работников заводов, научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и других организаций различных министерств и ведомств, будет способствовать дальнейшему ускоренному развитию энергетики страны, совершенствованию ее энергомашиностроительной базы.

К началу работы совещания были изданы тезисы докладов. Предполагается издание докладов.

УСУБОВ З. Г.

Семинар по водо-водяным реакторам во Франции

По водо-водяным энергетическим реакторам (ВВЭР) в рамках соглашения между ГКАЭ СССР и КАЭ Франции в 1974—1976 гг. состоялись три двухсторонних семинара. Последний из них по топливным композициям и конструкционным материалам твэлов проходил в Центре ядерных исследований Сакле с 18 по 24 февраля 1976 г.

Программа семинара включала, помимо теоретической части, посещение лабораторий, исследовательских реакторов и мастерских. От Советского Союза было представлено пять докладов о стендовых и реакторных испытаниях твэлов реакторов ВВЭР и АМБ, а также ТВС реакторов РВМ-К. Французские специалисты прочитали восемь докладов и передали советской делегации большое количество проспектов по технике внутри-реакторных измерений и оборудования «горячих» лабораторий.

Руководитель французской делегации Делафос Ж. в своем докладе изложил программу развития АЭС во Франции. В последние годы французская программа создания ядерно-энергетических установок претерпела существенные изменения. Вместо традиционных для Франции газографитовых реакторов в дальнейшем планируется строительство АЭС с реакторами LWR корпусного типа. Такое решение во многом объясняется

сложившимся топливно-энергетическим балансом страны в связи с ограниченностью ресурсов минерального топлива и энергетическим кризисом. Эта ситуация заставляет Францию увеличить долю электроэнергии, производимой на АЭС, с 22% в 1973 г. до 40% в 1985 г. с ежегодным приростом энергетической мощности 5—7 тыс. МВт(эл.). Для обеспечения темпа требуемого строительства АЭС признано целесообразным купить лицензии на реактор мощностью 925 МВт(эл.) у фирмы «Вестингауз» (США). Франция намерена построить до 1980 г. 17 таких реакторов. С 1980 по 1985 гг. предполагается построить еще 30 реакторов, из них шесть мощностью по 1300 МВт(эл.). Последние разрабатываются французскими специалистами и после 1985 г. предполагается строительство АЭС с реакторами только этого типа.

Первые загрузки реакторов на 925 МВт(эл.) будут производиться ТВС конструкции фирмы «Вестингауз», последующие — усовершенствованными сборками французской конструкции. В связи с этим КАЭ Франции разработана широкая комплексная программа расчетных и экспериментальных исследований топлива конструкционных материалов, создания и ресурсных испытаний твэлов и ТВС.

Реакторные испытания материалов и твэлов проводятся в реакторах ОЗИРИС в Сакле, СИЛОЭ — в Гренобле, БР — в Моле и прототипе транспортного установок ПАТ — в Кадараше. Характерной особенностью реакторов бассейнового типа ОЗИРИС и СИЛОЭ является их насыщенность экспериментальными устройствами. Так, в реакторе ОЗИРИС мощностью 70 МВт пять петель, в которых могут независимо испытываться несколько каналов (теплоноситель — вода, натрий, газ). В том же бассейне размещен макет реактора ИЗИС мощностью 1 МВт, который используется для просвечивающей нейтрографии. На ОЗИРИСе отработана методика гамма-спектрометрии твэлов непосредственно в бассейне, что вместе с методом нейтрографии позволяет контролировать выгорание топлива в твэле без его разрушения на различных этапах испытания. Кроме петлевых установок, широко используются индивидуальные каналы-зонды. Разработаны и в течение многих лет применяются четыре типа стандартных каналов-зондов многократного использования для облучения материалов и стержневых твэлов в исследовательских реакторах. Они являются одноступенчатыми для исследовательских центров КАЭ Франции. Испытания и последующие исследования проводятся по единым методикам, что позволяет сопоставлять получаемые результаты. Для различных программ испытаний разработаны многочисленные конструкции устройств и приспособлений. Заслуживают внимания надежные многосекционные нагреватели, устанавливаемые в экспериментальные каналы для обеспечения требуемой температуры испытания образцов. Каналы оснащаются термометрами для измерения температуры до 2600 °С, тензометрическими датчиками, мембранными датчиками для измерения давления внутри твэлов, датчиками перемещения с передачей сигнала при помощи волноводов и другими устройствами. Информация от экспериментальных устройств собирается и обрабатывается при помощи портативных ЭВМ, широко используется автоматика. Все это дает возможность экономить время и проводить одновременно разнообразные опыты. О масштабе исследований на реакторе СИЛОЭ мощностью 32 МВт говорят следующие цифры: общее количество каналов-зондов, испытанных в реакторе за 10 лет его работы, превышает 1000; суммарное время работы всех экспериментальных устройств — свыше 1 млн. ч.

Следует отметить насыщенность «горячих» камер лабораторий в Сакле современным оборудованием и приборами. Помимо стандартного комплекса испытательных машин и микроскопов в камерах имеются установки для непрерывного измерения размеров твэлов с помощью скользящих индукционных датчиков, аппараты рентгено-спектрального анализа типа КАМЕКА, установки для автордиографии и др. Особо следует обратить внимание на оснащенность «горячей» лаборатории разнообразными подъемно-транспортными внутрилабораторными механизмами, а также надежными системами манипуляторов американского и французского производства.

В рамках программы по LWR КАЭ Франции широко развернута работа по исследованию сплава циркалоя-4, используемого в качестве материала оболочки твэлов. Хотя этот сплав считается достаточно изученным, но данных по ползучести в диаметральной направленности, пластичности и прочности после облучения очень мало, что затрудняет выбор оптимальных научно обоснованных режимов термообработки и химического состава сплава. Было исследовано влияние содержания кислорода, олова, а также температуры отжига холо-

додетформированных твэльных труб на комплекс кратковременных и длительных механических свойств до и после облучения. Облучению были подвергнуты образцы практически всех вариаций состава сплава, а также различных режимов термообработки. Начиная с 1970 г. проведено более 20 000 измерений на облученных трубках. Установлено, что увеличение содержания в сплаве кислорода до 0,16%, олова до 2,6% существенно улучшает сопротивление ползучести в диаметральной направленности. Оптимальной термообработкой признан полный рекристаллизационный отжиг при 600 °С. В связи с полученными результатами во французские технические условия введены новые требования на содержание олова и кислорода в сплаве, предназначенном для оболочек твэлов, а также введены испытания труб на внутреннее давление с определением равномерного и неравномерного увеличения диаметра. Кроме циркалоя-4 проведены исследования сплава циркония с 1% ниобия. Установлено, что содержание кислорода в сплаве не менее 0,1% и отжиг при 700 °С улучшают сопротивление сплава ползучести в условиях реакторного облучения. При более низких температурах отжига характеристики прочности улучшаются, но сопротивление ползучести ухудшается. Показано, что оболочки твэлов из сплава цирконий — ниобий с кислородом имеют в 1,5 раза меньшую диаметральную ползучесть, чем из сплава циркалоя-4, термообработанные по оптимальному режиму.

По реакторному топливу — двуокиси урана — и твэлу в целом работы ведутся в следующих направлениях:

- установление предельных тепловых нагрузок;
- изучение выхода газообразных продуктов деления в зависимости от условий работы твэлов;
- определение граничных переходных режимов мощности при циклическом характере работы твэлов;
- определение влияния загрязнений топлива на работоспособность оболочек;
- исследование уплотнения топлива и усадки таблеток в продольном и поперечном направлениях;
- изучение механического взаимодействия топлива с оболочкой твэла;
- исследование теплопроводности топлива и тепловой проводимости зазора между топливом и оболочкой и др.

Значительные успехи достигнуты французскими специалистами в создании технологии изготовления таблеток с высокой стабильностью размеров при облучении. Полученные результаты исследований топлива и оболочек позволили КАЭ Франции рекомендовать изготавливать твэлы без введения под оболочку гелия под давлением, как это предусмотрено проектом фирмы «Вестингауз». В остальном требования к топливу и твэлам не отличаются от международных.

Испытания твэлов на повышенные нагрузки привели французских специалистов к выводу, что с точки зрения длительной работоспособности допустимая линейная мощность может превышать 600 Вт/см. Рассмотрение этого вопроса с позиций возможных аварийных ситуаций, например при обезвоживании активной зоны из-за разрыва трубопроводов большого диаметра, показывает необходимость ее ограничения до 370—400 Вт/см для принятых систем аварийного расхода топлива реактора. Вопросам безопасности АЭС с реакторами LWR КАЭ Франции придает исключительное значение и ассигнует большие средства на проведение экспериментальных работ.

АМАЕВ А. Д., ФИЛИПОВ В. Н.