

ОПЫТ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ-ЭНЕРГЕТИКОВ ПО ПРОБЛЕМАМ, СВЯЗАННЫМ С ВЫБОРОМ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЧНОСТЬЮ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

д.т.н., профессор Боровков В.М., д.т.н., профессор Гецов Л.Б. (СПбГПУ)

Вопросы обеспечения надежности оборудования тепловых электростанций в настоящее время являются приоритетными в работе современных инженеров-энергетиков. В число ингредиентов, определяющих надежность элементов паровых и газовых турбин, котельных установок, турбогенераторов, питательных насосов, редукторов входят:

- особенности конструкторского исполнения;
- выбор материалов, технология изготовления заготовок и готовых деталей;
- особенности эксплуатации, в частности связанные с режимами пуска и коррозионно-эрозионной активностью среды;
- комплекс механических характеристик материалов в широком диапазоне температур, включая прочностные и пластические характеристики, сопротивление ползучести, длительному статическому разрушению, сопротивление высокочастотной, малоцикловой и термической усталости;
- частотные характеристики и особенности демпфирования колебаний;
- методы контроля, методы исследования структуры материалов в процессе длительной эксплуатации;
- адекватность используемых методов расчета напряженно-деформированного состояния, критериев прочности;
- адекватность используемых расчетных методов оценки скорости роста образовавшихся во время эксплуатации трещин разной природы;
- использование современных норм прочности;
- обоснованность применяемых методов продления ресурса деталей «по состоянию».

Энергетика России базируется на основе существующей триады – «Тепловые электрические станции, атомные электрические станции, гидравлические электростанции». В общей структуре генерирующих мощностей около 70% занимают тепловые электрические станции (ТЭС), составляющие основу энергетики страны.

Периоды развития теплоэнергетики России можно разделить на следующие основные этапы:

1. От плана ГОЭЛРО до начала 40-х годов, который характеризуется использованием в тепловых электрических станциях параметров пара среднего давления 29-35 кг.с/см², температуры 400 – 435 °С и единичной мощности до 50-100 МВт;

2. Послевоенный этап развития, от середины 40-х до начала 60-х годов, который характеризуется переходом к начальным параметрам пара высокого и повышенного давления (90 кг.с/см², кг.с/см²), температуры 500-535 °С, 540- 560 °С и единичной мощ-

ности 100-200 МВт для ТЭС различного назначения;

3. С начала 60-х до начала 90-х годов, который характеризуется применением сверхкритического давления 240 кг.с/см², температуры 540-560 °С и единичной мощности 300, 500, 800 и 1200 МВт;

4. С конца 90-х и по настоящее время, который характеризуется разработкой и внедрением парогазовых установок с котлами-утилизаторами и сбросом газов в котел, с температурой газа перед газовой турбиной 1150-1200 °С и более, мощностью парогазовых установок (ПГУ) до 450 МВт, разработкой технических предложений по созданию парового энергоблока с давлением пара 300 кг.с/см² и температурой 600/600 °С.

На первом этапе развития энергетики происходила реализация плана ГОЭЛРО (до начала 1930-х годов), которая базировалась на применении оборудования импортного производства (первая советская турбина была выпущена ЛМЗ в 1924 году). На ТЭС устанавливалось оборудование с давлением 29-35 кг.с/см², температурой 400- 435 °С. Единичная мощность составляла 25-50 МВт, и только к концу 30-х годов была создана и установлена более мощная турбина АК-100, рассчитанная на более высокое (на среднее) давление.

С начала 1930-х годов было начато строительство отечественных энергомашиностроительных заводов. В 1934 году был пущен Харьковский турбинный завод. В это же время сооружаются Подольский котельный завод (или завод имени Орджоникидзе, «ЗИО»), Таганрогский котельный завод «Красный котельщик» и ряд других предприятий. Все импортное и отечественное энергооборудование в то время изготавливалось с применением углеродистых сталей для температуры пара до 435 °С. При эксплуатации этого оборудования не возникало серьезных проблем с надежностью компонентов.

На втором этапе развития энергетики, начиная с 1945 года, началось сооружение ТЭС, рассчитанных на высокое давление и высокие температуры, что потребовало применения легированных сталей перлитного класса, пригодных для работы при температуре 480-530 °С (хромомолибденовой стали марок 12ХМ, 15ХМ и хромомолибденованадиевых сталей марок 12ХМФ, 12Х1М1Ф1. Это потребовало организации испытаний и системы контроля металла на ползучесть, длительную прочность, а также исследований по изменению структуры металла во время длительной эксплуатации (100, 200 и 300 тыс. часов работы). В это же время в энергосистемах и на крупных электрических станциях создают-

ся службы и лаборатории испытания металлов.

В 1953 году на Черепетской ГРЭС (г. Суворов Тульской обл.) был пущен первый энергоблок, рассчитанный на сверхвысокие параметры $170 \text{ кг}^* \text{c}/\text{см}^2$ и $560 \text{ }^\circ\text{C}$ (СВК-150), где впервые в отечественной энергетике были применены высоколегированные аустенитные стали (типа 12X18H9T) и на ГРЭС была создана специальная лаборатория для контроля и наблюдения за поведением металла.

В этот период отмечается большое количество аварий, связанных с разрывом труб пароперегревателей котлов вследствие неудовлетворительного контроля качества металла труб со стороны монтажных организаций и эксплуатационников. Под влиянием аварий обратились к прошлому опыту и стали применять трубы из углеродистой стали вместо легированной.

На третьем этапе развития энергетики, с начала 60-х годов, когда начался ввод в эксплуатацию энергоблоков 300 МВт, рассчитанных на сверхкритические параметры пара, на Костромской, Конаковской, Черепетской, Кармановской, Киришской ГРЭС, резко усилился контроль состояния металла в процессе эксплуатации как со стороны технических служб предприятий, так и со стороны головных НИИ, таких как ВТИ, ЦКТИ и ряда других. Создаются уникальные стенды для исследования и определения характеристик длительной жаропрочности и других свойств металла энергетического оборудования.

В этот период возникли новые проблемы надежности оборудования, действующего при высоком и повышенном давлении, имеющего наработки 100 и 200 тыс. часов и более. Они были связаны с появлением трещин в околошовной зоне опускных труб барабанов котлов, изготовленных из стали 16 ГНМ. Для обеспечения надежности котлов потребовались значительные усилия по разработке технологии устранения трещин, выпуску специальных противаварийных циркуляров и даже замены барабанов («Первомайская ТЭЦ» Ленэнерго). Участились случаи разрывов гибов опускных труб барабанных котлов и гибов труб главных паропроводов. Как показали исследования, проведенные ВТИ и другими организациями, разрывы гибов опускных труб происходили по внешней образующей гибов, либо по срединной, «нейтральной» поверхности. Причины разрывов были отнесены к недостаточной компенсирующей способности опускных трубопроводов и дефектам заводского изготовления на внешней части гига. В результате пришлось заменять 100 % гибов опускных труб, используя трубы с большей толщиной стенки.

В процессе эксплуатации паротурбинного оборудования стали выявлять трещины в цилиндре высокого давления (ЦВД), вызванные воздействием разностей температур между верхней и нижней его частями, между корпусом и фланцем, а также по ширине фланца при сбросе и набросе нагрузки и в процессе пусковых операций при прогреве оборудования.

Четвертый этап развития энергетики характери-

зуется бурным развитием парогазовых технологий. Ведены два головных блока по 450 МВт на Северо-Западной ТЭЦ и Южной ТЭЦ ТГК-1 в С.Петербурге, на Сочинской и Калининградской ТЭЦ, пущен блок мощностью 450 МВт на ТЭЦ-27 в Мосэнерго (ТГК-3). Проектируются новые блоки на Юго-Западной и Правобережной ТЭЦ ТГК-1, на ТЭЦ-21 в С.Петербурге. Планируется сооружение ПГУ на Северной, Южной, Автовской ТЭЦ и ТЭЦ-17 ТГК-1 в С.Петербурге.

Вместе с тем, оборудование многих давно эксплуатирующихся ТЭЦ и ГРЭС морально и физически стареет, нарастает опасность выхода из строя его компонентов, и требуется либо их замена, либо обоснованное продление срока службы.

Продление срока службы на базе технического перевооружения становится главной задачей энергетики на ближайший период. Эта проблема связана с решением комплекса задач по повышению надежности металла ТЭС, работающего при высоких температурах и подвергающегося тепловым ударам в процессе эксплуатации. Решение этой проблемы требует изучения, анализа и разработки технических мероприятий по повышению надежности металла как действующего, так и проектируемого оборудования ТЭС.

В настоящее время в РФ эксплуатируются более 3000 средних и крупных ТЭС трех типов: с паровыми турбинами, котлами и турбогенераторами; с газовыми турбинами и турбогенераторами; установки комбинированного цикла (газовая турбина, паровая турбина, котел и турбогенератор). Кроме того, на газопроводах эксплуатируется более 5000 газотурбинных установок.

Оборудование ТЭС состоит из деталей, работающих в самых разных условиях, как по температуре и характеру их нагруженности, так и по окружающей их среде (масло, вода, пар, газы и т.д.).

В последние годы существенно изменились методы расчетов прочности в связи с внедрением в практику расчетов методик, основанных на использовании метода конечных элементов, методик оценки живучести деталей с дефектами и методик определения термоусталостной долговечности деталей. Также существенным является внедрение новых методов определения характеристик материалов, используемых для определения напряженно-деформированного состояния и прочности деталей. Все сказанное позволяет повысить надежность расчетов прочности деталей. В то же время в эксплуатации находятся энергетические установки, спроектированные более 30 лет тому назад с использованием устаревших методик оценки прочности. Поэтому подготовка современных инженеров-энергетиков требует внедрения в учебный процесс новых подходов.

В связи с изложенным в СПбГПУ для студентов старших курсов и аспирантов энергомашиностроительного факультета, начиная с 2004 г, читается специальный курс «Материалы и прочность оборудования ТЭС». Этот курс основан на ранее полученных знаниях по специальным предметам и знаниях

по металловедению и сопротивлению материалов. Преподавание производится с использованием ряда методических пособий, обобщенных в виде учебного пособия, которое в 2008 г будет выпущено издательством Политехнического университета под редакцией авторов настоящей статьи. Авторами этого учебного пособия являются высококвалифицированные специалисты, доктора технических наук Боровков В.М., Гецов Л.Б., Воробьев Ю.С., Копсов А.Я., Петин С.В., Пигрова Г.Д., Рыбников А.И. Учебное пособие состоит из 11 глав.

В главе 1 излагаются общие сведения об оборудовании ТЭС, общих требованиях к прочности оборудования, механических свойствах конструктивных материалов, регламентируемых техническими условиями на материал (твердость и прочность, пластичность, хрупкость, напряжения, деформации и условия разрушения при сложном напряженном состоянии).

В главе 2 рассматриваются требования к материалам основных деталей турбин, котлов, турбогенераторов и компрессоров, приводятся характеристики физических свойств и описываются различные материалы, применяемые в энергомашиностроении. Поскольку в энергетике используются материалы разных классов, то помимо железных сплавов (строительных, автоматных и арматурных, малоуглеродистых конструкционных, несвариваемых конструкционных, теплостойких, жаропрочных, жаростойких и нержавеющей высокопрочных, немагнитных, пружинных, штамповых, износостойких и электротехнических сталей, чугунов), рассматриваются также цветные сплавы, применяемые в энергомашиностроении (сплавы на никелевой основе, титановые сплавы, кобальтовые сплавы, композиционные материалы, алюминий и его сплавы, медные сплавы, оловянистые сплавы, магниевые сплавы), керамические материалы, литые наплавочные материалы. Даются основы термической обработки сталей и сплавов на никелевой основе. Описываются современные покрытия и методы поверхностного упрочнения деталей из сталей и сплавов. Рассматриваются применяемые обозначения отечественных и зарубежных металлических материалов.

Глава 3 посвящена описанию типовых разрушений элементов энергооборудования при эксплуатации и стендовых испытаниях. Приводится большое число фотографий повреждений различных деталей, связанных со статическими пластичными и хрупкими разрушениями, усталостью, термической усталостью, коррозией, эрозией и коррозионным растрескиванием. Этому описанию предшествуют краткие сведения о конструкции соответствующих видов оборудования (паровых турбин и арматуры, газовых турбин, шестерен редукторов, элементов котлов, деталей турбогенераторов, деталей энергетических насосов).

Вопросам коррозии материалов и ее влияния на прочность деталей энергоустановок посвящена **глава 4**.

В ней рассматриваются:

- коррозия материалов в воде и паре (коррозия котельных сталей и материалов конденсатно-питательного тракта и коррозия трубных систем подогревателей и конденсаторов из медных сплавов);
- межкристаллитная и язвенная коррозия сталей;
- коррозионное растрескивание;
- коррозионная усталость;
- высокотемпературное окисление;
- сульфидно-оксидная коррозия лопаток газовых турбин;
- ванадиевая коррозия;
- сопротивление материалов эрозии (эрозия подвижных элементов проточной части энергетических машин, эрозия неподвижных элементов проточной части энергетических машин);
- прочность защитных покрытий в коррозионной среде;
- контактная коррозия;
- коррозия в жидкометаллических теплоносителях (термический перенос массы, изотермический перенос массы, перераспределение неметаллических примесей из твердого металла в жидкий);
- фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость;
- коррозия тепловых сетей;
- водородная коррозия.

Глава 5 посвящена описанию различных методов исследования структуры материалов. В разделе «Металлографические методы» рассматриваются методы макроscopicого и микроскопического анализа, количественной металлографии.

Излагаются основы рентгеноструктурного анализа материалов, основы метода физико-химического фазового анализа, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа. Дается описание современного оборудования для исследования структуры материалов.

В главе 6 рассматриваются процессы ползучести и длительной прочности металлических материалов. Излагаются методы обработки экспериментальных данных: зависимости скорости ползучести на стадии установившейся ползучести, методы аппроксимации кривых ползучести, характеристики длительной прочности, изохронные кривые ползучести, параметрические зависимости, методы экстраполяции, влияние на длительную прочность структурных изменений в материале при эксплуатации. Описываются основные закономерности ползучести и релаксации напряжений. Дается классификация процессов ползучести при различных условиях нагружения. Рассматриваются реологические модели ползучести и теории ползучести, влияние ползучести на сопротивление упруго-пластическому деформированию, циклическая ползучесть, ползучесть и длительная прочность в условиях сложного напряженного состояния, скорость роста трещин ползучести.

Колебаниям элементов турбомашин посвящена **глава 7**. В ней рассматриваются колебания рабочих лопаток турбомашин (понятие о собственных колебаниях лопаток турбомашин и их классификация, влияние закрепления лопаток, температурных

полей и центробежных сил на колебания лопаток), колебания пакетов лопаток, колебания рабочих колес турбомашин (колебания дисков, построение резонансных диаграмм (Кэмпбелл-диаграмм)). Рассматриваются причины возбуждения колебаний лопаточного аппарата турбомашин и меры борьбы с ними (отстройка от опасных резонансных режимов, снижение уровня вынужденных колебаний лопаточного аппарата, предотвращение опасных самовозбуждающихся колебаний). Анализируются колебания роторов турбомашин, в том числе совместные колебания роторов и лопаточного аппарата турбомашин. Уделяется внимание вопросам колебаний других элементов турбоагрегата.

В главе 8 излагаются вопросы усталости материалов и сварных конструкций.

Рассматриваются факторы, влияющие на сопротивление усталости материала в конструкции (роль концентрации напряжений, влияние постоянного компонента нагрузки, влияние повышенной температуры, влияние вида напряженного состояния). Анализируются особенности переменного нагружения деталей машин и конструкций и правило линейного суммирования повреждений. Излагаются вопросы, связанные с малоцикловой усталостью (циклические кривые, критерий разрушения, расчеты усталости при случайном нагружении). Особое внимание уделяется вопросам распространения трещин усталости (коэффициенту интенсивности напряжений, факторам, влияющим на подрастание трещин, расчету долговечности при подрастании трещины и остаточному ресурсу конструкций).

Глава 9 посвящена вопросам термической усталости и методам прогнозирования надежности конструкций при термоциклическом нагружении. В ней рассматриваются методы определения сопротивления термической усталости материалов влияние различных факторов на сопротивление термической усталости материалов и конструкций, критерии разрушения и современные методы расчета долговечности деталей и методы расчета

живучести. Необходимо отметить, что традиционное использование расчетной формулы Мэнсона может давать ошибку в определении долговечности, на несколько порядков, превышающую реальную долговечность. Поэтому в учебном пособии приводятся предпочтительные методы- расчетно-экспериментальный, основанный на использовании теории приспособляемости и деформационного критерия разрушения. Описываются также современные методы расчетного определения нестационарных температурных полей, основанные на решении связанных задач. Приводится пример определения размаха деформаций за цикл при термоциклическом нагружении лопатки.

Описанию методов неразрушающего контроля элементов конструкций в процессе изготовления и эксплуатации посвящена **глава 10**. В ней излагаются основы капиллярного контроля поверхности деталей, металлографического контроля методом реплик, магнитопорошковой дефектоскопии, ультразвукового контроля, рентгеновской дефектоскопии, гамма дефектоскопии, рентгеновского метода определения остаточных напряжений.

Последняя **11 глава** учебника посвящена вопросам методологии продления назначенного ресурса деталей и нормативным документам, используемым для контроля их состояния. В ней рассматриваются современные подходы к определению запасов прочности разных материалов при разных видах нагружения, описываются вопросы, связанные с оценкой напряженно-деформированного состояния при использовании в расчетах метода конечных элементов. Описываются методология продления назначенного ресурса деталей и экспертная система контроля и оценки условий эксплуатации котлоагрегатов ТЭС. Дается перечень и описывается основное содержание ряда нормативных документов, используемых в энергетике.

В каждой главе учебника дается список литературы, в которой излагаемые вопросы рассматриваются более подробно.

