

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.178

Многоканальная система тензо- и термометрии элементов конструкций

С. В. Романов^а, Г. В. Степанов^б, В. В. Харченко^б, А. И. Бабуцкий^б,
Ю. Н. Ланкин^в, Н. А. Феофентов^в, И. В. Кравченко^г

^а Ассоциация «Надежность машин и сооружений», Киев, Украина

^б Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

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

^г ОП «Южно-Украинская АЭС», Южно-Украинск, Украина

Описана разработанная на современной элементной базе 32-канальная система для исследования натуральных конструкций, обеспечивающая непрерывное измерение в течение длительного промежутка времени деформаций и температур в диапазоне до +350°C, а также накопление и хранение результатов измерений. Система была использована для регистрации упругих деформаций и температуры узла приварки «горячего» коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 в период между планово-предупредительными ремонтами. Результаты измерений свидетельствуют о сложном характере распределения напряжений и температур, который отличается от осесимметричного.

Ключевые слова: натурная тензо- и термометрия, напряженно-деформированное состояние, коллектор, патрубок парогенератора.

В ряде случаев при оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций из-за их сложной геометрической конфигурации и воздействия различных сочетаний нагрузок численные, а тем более аналитические методы расчета НДС и используемые уравнения состояния материала могут оказаться неэффективными. Это может быть обусловлено как существенными и зачастую необоснованными упрощениями, принятыми при выполнении расчетов, так и недостаточной полнотой сведений о характере и величине действующих нагрузок и их изменении во времени, особенно при аварийных и нештатных режимах эксплуатации машин и оборудования. Поэтому возникает необходимость в экспериментальном определении НДС элементов конструкций.

Для определения реального НДС элементов конструкций и деталей машин применяется натурная тензо- и термометрия (НТТМ) [1–3]. Полученные значения деформаций и напряжений и их изменение во времени в процессе эксплуатации являются наиболее близкими к реальным и могут эффективно использоваться для обоснованной оценки прочности элементов конструкций, а также для разработки рекомендаций по оптимизации режимов их эксплуатации с целью повышения надежности и ресурса.

© С. В. РОМАНОВ, Г. В. СТЕПАНОВ, В. В. ХАРЧЕНКО, А. И. БАБУЦКИЙ, Ю. Н. ЛАНКИН, Н. А. ФЕОФЕНТОВ, И. В. КРАВЧЕНКО, 2003

ISSN 0556-171X. Проблемы прочности, 2003, № 4

143

Для оценки НДС элементов оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок была разработана и изготовлена на современной элементной базе 32-канальная система НТТМ.

Система НТТМ предназначена для непрерывного измерения упругих деформаций и температуры на элементах эксплуатируемых конструкций в течение длительного времени, а также для накопления и последующей обработки зарегистрированных данных с использованием персонального компьютера. Особенность системы заключается в возможности передачи результатов измерений на компьютер, расположенный от объекта измерений на расстоянии до 1200 м. Ниже приведены ее основные технические характеристики.

Количество тензодатчиков (полумостов)	16
Сопротивление тензодатчика	≥ 100 Ом
Напряжение питания моста тензодатчиков	12 В постоянного тока
Диапазон измеряемых напряжений моста тензодатчиков	± 15 мВ
Балансировка моста	± 2 мВ
Количество термопар	16
Типы термопар	J, K, T, E, R, S, B, N, C, L, M
Представление значений температуры	пять значащих цифр
Максимальная частота измерений	10 Гц
Максимальное расстояние между системой и компьютером без дополнительной аппаратуры	1200 м
Максимальная температура объекта	+350°C
Диапазон рабочих температур измерительного блока системы	-20...+70°C

Система НТТМ состоит из блока первичных преобразователей, измерительного блока и модуля промышленного компьютера. В блок первичных преобразователей входят тензодатчики (активный и термокомпенсирующий, включенные по схеме полумоста) и термопары, устанавливаемые (привариваемые) на исследуемом объекте. Трехпроводный экранированный кабель соединяет каждую пару тензодатчиков (полумост) с терминальными платами измерительного блока. Термопары также подсоединены к измерительному блоку. В данном случае использовались соединительные кабели длиной около 30 м.

Измерительный блок включает терминальные платы, электронные модули аналогового ввода и модули цифрового вывода. На терминальных платах находятся резисторы второго плеча моста с балансировочными потенциометрами. Каждый мост запитывается от индивидуального стабилизированного источника питания. Напряжение с диагонали моста подается на вход модуля аналогового ввода. Модуль имеет 16 дифференциальных входов, программно настроенных на измерение напряжений ± 15 мВ с точностью $\pm 0,1\%$. Термопары подключены ко входам модулей аналогового ввода измерительного блока, при этом каждый модуль программируется на используемый тип термопар. Цифровые значения измеренных напряжений разбаланса и э.д.с. термопар передаются по интерфейсу RS-485 в промышленный компьютер со скоростью 115 кбод.

Управление системой НТТМ осуществляется промышленным компьютером с помощью специально разработанных программных средств.

Система использовалась при определении фактического напряженно-деформированного и температурного состояния узла приварки “горячего” коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 энергоблока с реактором ВВЭР-1000 (Южно-Украинская АЭС). Были зарегистрированы данные на всех режимах работы реакторной установки: при гидроиспытаниях (ГИ), пуске, при нормальных условиях эксплуатации, остановке. Поскольку система НТТМ была задействована в течение всего цикла эксплуатации энергоблока в период между планово-предупредительными ремонтами, она фактически являлась средством контроля и непрерывного мониторинга нагруженности рассматриваемого узла во время эксплуатации.

Повышенный интерес к узлу обусловлен его неоднократными повреждениями в течение 1998–2001 гг. на разных АЭС [4]. В связи с этим был выполнен контроль его напряженно-деформированного и температурного состояния, некоторые результаты которого приведены ниже.

На рис. 1 изображена схема “горячей” ветви одной из петель первого контура теплоносителя атомной энергетической установки с реактором ВВЭР-1000, на рис. 2 показаны узел приварки и места установки ряда тензодатчиков и термопар.

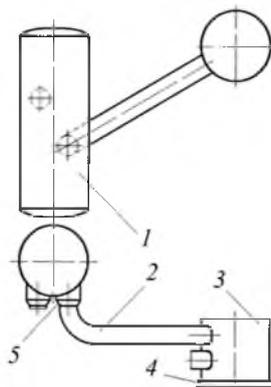


Рис. 1. Схема “горячей” ветви первого контура реактора (вид сверху и сбоку): 1 – парогенератор (ПГ); 2 – главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ); 3 – корпус реактора; 4 – опорный бурт корпуса реактора; 5 – узел приварки.

Результаты измерений указывают на отсутствие каких-либо непроектных режимов нагружения элементов оборудования, приводящих к перегрузке узла приварки. Кроме того, была исключена предварительная гипотеза о разрушении узла приварки из-за заклинивания или подтормаживания катковых опор парогенератора, что противодействовало бы перемещению последнего в горизонтальной плоскости при термическом расширении горизонтального участка главного циркуляционного трубопровода (рис. 1), и как следствие, приводило к дополнительному нагружению узла приварки.

На рис. 3 представлено распределение осевых (параллельных оси патрубка) напряжений по окружности сварного шва узла приварки при нормальных условиях эксплуатации. Напряжения рассчитывали по стандартной методике [1–3] с использованием результатов измерений соответ-

вующих деформаций. Полученные данные свидетельствуют, что распределение напряженности по окружности патрубка парогенератора имеет неоднородный характер. Выбор и верификацию вариантов схем численного моделирования узла приварки необходимо проводить с помощью этих данных.

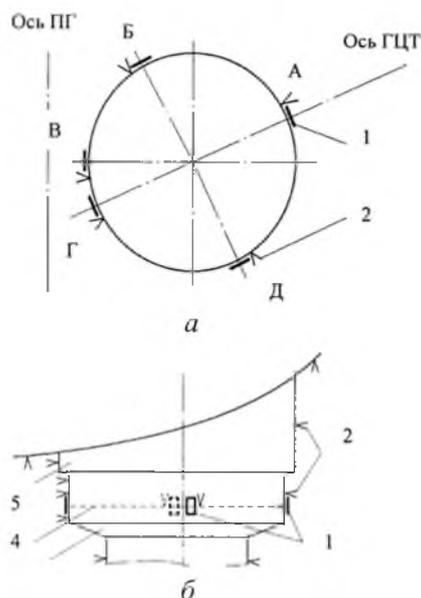


Рис. 2. Схема установки датчиков при НТТМ узла приварки: *a* – вид сверху; *б* – вид сбоку. (1 – тензодатчик; 2 – термопара; 3 – коллектор парогенератора; 4 – сварной шов; 5 – патрубок парогенератора; здесь и на рис. 3: точки *A*, *B*, *V*, *Г*, *Д* соответствуют месту установки тензодатчиков.)

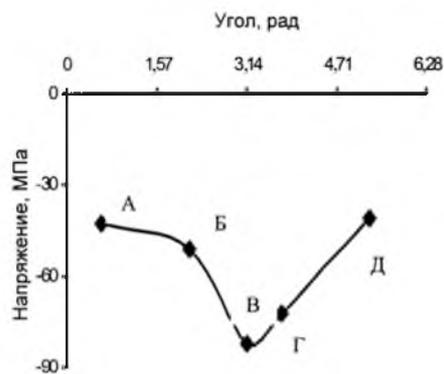


Рис. 3. Распределение осевых напряжений по периметру сварного шва узла приварки.

По результатам измерения температуры на наружной поверхности узла приварки во время эксплуатации реактора установлено наличие градиента температуры вдоль образующей патрубка, причем вдоль короткой части он выше, чем вдоль длинной (15 и 9°C соответственно). Измерение распределения температуры вдоль окружности сварного шва показало, что в области короткой части патрубка она более низкая, чем в области длинной, т.е. и в этом направлении имеет место градиент температуры порядка 6°C.

Указанные изменения температуры влияют на распределение напряжений и деформаций в узле приварки, что также следует учитывать при анализе НДС.

В заключение отметим, что в результате анализа поведения подобных конструкций наиболее надежные и полные данные можно получить при сочетании экспериментальных методов НТТМ, инженерных и численных расчетов. В связи со сложностью проведения НТТМ на эксплуатируемом оборудовании АЭС это позволяет не только минимизировать число точек измерений, но и корректно интерпретировать результаты анализа и делать обоснованные выводы.

Выводы

1. Разработана и изготовлена система НТТМ, работоспособность которой проверена в реальных условиях эксплуатации оборудования АЭС (высокая температура, нейтронное излучение).

2. По результатам натурной тензо- и термометрии установлено, что напряженно-деформированное состояние узла приварки “горячего” коллектора к патрубку парогенератора существенно отличается от осесимметричного, имеет место также градиент температур по высоте патрубка и по его окружности.

Резюме

Описано розроблену на сучасній елементній базі 32-канальну систему для дослідження натурних конструкцій, яка забезпечує безперервне вимірювання на протязі тривалого часу деформацій і температур у діапазоні до +350°C, а також накопичення та збереження результатів вимірювань. Система була використана для реєстрації пружних деформацій та температури вузла приварки “горячого” колектора до патрубка парогенератора ПГВ-1000 в період між планово-попереджувальними ремонтами. Результати вимірювань дозволяють зробити висновок про складний характер розподілу напружень та температур, що відрізняється від вісесиметричного.

1. Дайчик М. Л., Пригоровский Н. И., Хуришудов Г. Х. Методы и средства натурной тензометрии. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. Справочник. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
3. Исследование температурных напряжений / Отв. ред. Н. И. Пригоровский. – М.: Наука, 1972. – 228 с.
4. Зубченко А. С., Разыграев Н. П., Харина И. Л. и др. Результаты исследований характера эксплуатационных повреждений металла в зонах сварных узлов коллекторов с патрубками Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000: Тр. VII Междунар. конф. “Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”. – СПб., 2002.

Поступила 17. 01. 2003