

А. С. ЦЫБЕНКО, Н. Г. КРИЩУК, И. П. ДУРАВКИН,  
С. А. ЗЛАКАЗОВ (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

## ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ ЭНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Розглянуто проблеми довговічності і міцності елементів енергетичного машинобудування.

Рассмотрены проблемы долговечности и прочности элементов энергетического машиностроения.

There are the considered problems of longevity and durability of elements of power machinecreation in the article.

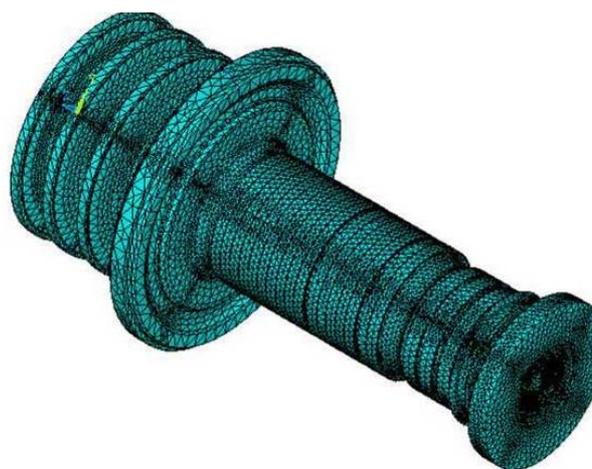
Наработка высокотемпературных элементов энергетического машиностроения (котлов, турбин, паропроводов и других конструкций) из теплостойких сталей к настоящему времени в большинстве случаев составляет 250...300 и более тыс. часов. Самые длительные (и самые дорогостоящие) эксперименты, осуществленные к настоящему времени в промышленности над жаропрочными сталями, не превышают 11 лет [1], т. е. в два раза меньше ресурса эксплуатации оборудования изготовленного на их основе.

В различных отраслях отечественной промышленности по мере увеличения эксплуатации оборудования происходила эволюция понятия ресурса его работоспособности. Сужение этого понятия от проектного, паркового до сверхпаркового ресурса безопасной эксплуатации возможно только в результате специального экспертного обследования несущей способности оборудования. Одним из компонентов такой оценки работоспособности оборудования являются поверочные численные расчеты его термомеханического состояния, прочности и долговечности при математическом моделировании различных программ термосилового нагружения. Основой для оценки расчетного остаточного ресурса работоспособности энергомашиностроительных конструкций должны являться термомеханические свойства материалов в состоянии после их длительной эксплуатации.

**Актуальность задачи исследования.** О современном состоянии проблемы прогнозирования ресурса работоспособности оборудования (рис. 1), перспективах и трудностях наиболее полно можно судить из литературных источников [2].



*a*



*б*

Рис. 1. Ротор турбины К200-130  
дисковой конструкции с повреждениями после  
длительной эксплуатации (*a*) и конечно-элементная  
модель части ротора турбины К200-130 (*б*)

Значительная часть современных машин и конструкций работает в условиях циклически изменяющихся термомеханических нагрузок. Протекающие в них процессы отличаются нелинейным характером, а прочностные и механические свойства металла могут быть изменены за счет комплексного воздействия ползучести, малоциклового усталости и локальной повреждаемости [1; 2]. В этих условиях расчетное определение напряженно-деформированного состояния (НДС) и расчет долговечности представляют сложную задачу.

Экспериментальные данные. Как в Украине, так и за рубежом практика оценки состояния металла базируется на испытаниях образцов, вырезанных из контрольных участков. Представительность этих испытаний зависит от двух факторов – оценки повреждаемости контрольных образцов из условий адекватных наиболее нагруженному участку конструкции и правильному (оптимальному) выбору оценочных характеристик качества металла.

Например, результаты исследования [3] металла пробок, вырезанных из барабанов котлов, показали, что за 200 тыс. ч эксплуатации значения твердости, пределов текучести и прочности стали 16ГНМ снижаются на 15...20 %, а ударная вязкость соответственно на 50...60 % и в ряде случаев достигает 3...4 кгм/см<sup>2</sup>.

Принципиально отличные от стали в исходном, до эксплуатации, характеристики суб- и микроструктуры определяют специфический механизм упрочнения сталей после их длительной эксплуатации в качестве материала высокотемпературных элементов оборудования. Сопrotивление деформации и разрушению при ползучести состаренных в условиях эксплуатации хромомолибденовых сталей перлитного

класса определяются доминантой дисперсионного упрочнения карбидами ванадия.

Принципиально отличные от стали в исходном состоянии характеристики структуры и доминирующего механизма упрочнения позволяют рассматривать длительно эксплуатирующуюся сталь как сталь данной марки в качественно ином состаренном, стабилизированном состоянии. Жаропрочные свойства стабилизированной стали характеризуют длительное комплексное воздействие на металл ползучести и малоциклового усталости в течение сотен тысяч часов реальной эксплуатации, условия которой практически невозможно имитировать в лаборатории.

В сообщении приведены экспериментально полученные значения номинальных допускаемых напряжений для стабилизированной стали 12Х1МФ в интервале температур 803...873 К и заданного ресурса, превышающего минимальный срок эксплуатации испытанных партий стали (150 000 час) на время 10...200 тыс. час, т. е. до общей наработки металла 350 тыс. час в указанном выше интервале температур. Анализ полученных данных показывает, что длительное, в течение 150 и более тыс. час эксплуатационное старение приводит к снижению предела длительной прочности и соответственно допускаемых напряжений на 20...25 %, сравнительно со сталью в состоянии поставки.

Полученные экспериментально данные о допускаемых напряжениях для стабилизированной стали 12Х1МФ применены для оценки расчетного ресурса длительно эксплуатирующихся конструкций роторов среднего и высокого давления (см. рис. 1), корпуса (рис. 2) ТЭС на основе расчетно-теоретического исследования их термонапряженного и деформированного состояния при эксплуатационных нагрузках.

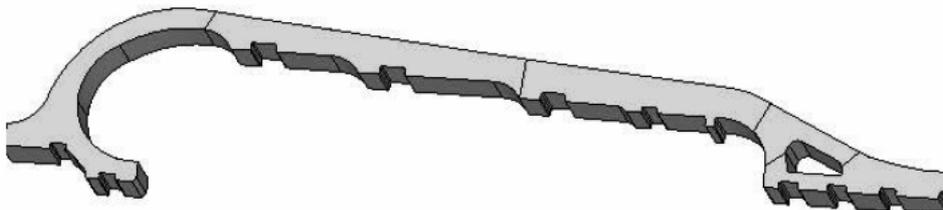


Рис. 2. Твердотельная модель фрагмента сечения корпуса турбины К200-130

**Условия работы энергетического оборудования.** Ротор имеет рабочие лопатки и передает рабочий крутящий момент генератору. Подача перегретого пара в корпус ротора осуществляется с заданным расходом, высоким давлением и температурой.

Напряжения в роторе возникают вследствие наличия центробежных сил инерции, обуслов-

ленных его вращением, неравномерного поверхностного давления и градиентов температур в объеме материала.

Неоднородное теплонапряженное состояние неподвижного корпуса ротора зависит только от давления пара и его температуры на различных этапах циклического термосилового нагружения. При умеренных температурах

материал корпуса и ротора работает в условиях упругости. При повышенных температурах ( $T \geq 723 \text{ K}$ ) сказывается ползучесть материала. Для экспертной оценки корпус и ротор должны быть проверены на статическую кратко-

временную, длительную и термоциклическую прочность. При необходимости следует учесть напряжения для зон металла с установившейся или неустановившейся деформацией ползучести (рис. 3).



Рис. 3. Дискретная модель фрагмента меридионального сечения асимметричной расчетной схемы корпуса турбины K200-130

**Исследование НДС и прочность энергетического оборудования.** Повторные переходные режимы работы оборудования обуславливают циклическое деформирование материала и могут быть причиной появления термоусталостных трещин в роторах.

В результате исследования их термонапряженного состояния при сложном пространственно-временном термосиловом нагружении установлено, что опасными зонами роторов являются такие, которые расположены около пазов для крепления лопаток, вблизи разгрузочных тепловых канавок на поверхности вала, в местах расположения уплотнений, в зоне перехода от диска к валу. В перечисленных зонах доминирующими являются величины местных напряжений, обусловленных температурными воздействиями. При достаточно высоких температурах и переходных режимах работы оборудования здесь возникают повторные пластические деформации, сопровождающиеся ползучестью. Наиболее вероятным является возникновение в данных зонах термоусталостных трещин. Ползучесть способствует увеличению деформаций и вызывает дополнительное повреждение материала в зонах перегрузки.

Порядок численного расчета термонапряженного состояния таких конструкций с заданной историей различных этапов пространственно-временного термосилового нагружения может быть выполнен в конечноэлементном пакете прикладных программ, позволяющем моделировать различные условия деформирования материалов, например, с использованием [4].

Для расчета параметров повреждаемости на цикле нагружения используется информация о размахе амплитуд местных напряжений и деформаций в наиболее опасном сечении. Физическая природа развития повреждений от усталости и ползучести различна. При совместном протека-

нии этих процессов происходит их взаимное влияние, которое имеет сложный характер. Для оценки ресурса используется гипотеза суммирования повреждений как от повторного упруго-пластического деформирования, так и от деформаций ползучести. Уравнения для расчета ресурса долговечности энергооборудования должны отражать свойства сталей в стабилизированном состоянии после длительной эксплуатации [3].

Для уменьшения накопления повреждений оборудования после длительной эксплуатации рекомендуется снижение скоростей, изменения амплитуд термосиловых нагрузок, т. е. удлинение времени пуска, нагружения и остановки оборудования в сочетании с другими возможно допустимыми технологическими мероприятиями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Писаренко Г. С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев. – К.: Научная думка, 1976. – 416 с.
2. Бобир М. І. Моделі накопичення пошкоджень при складному малоцикловому навантаженні / М. І. Бобир, А. П. Грабовський, Б. О. Яхно // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт», серия машиностроение, 2003. – С. 43–47.
3. Добровольский В. Е. Мониторинг состояния оборудования ТЭС / В. Е. Добровольский, М. А. Заводный, С. С. Солдатов и др. // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: Матеріали 4-ї Національної науково-технічної конференції і виставки. – 2003, – К., 2003. – С. 213–215.
4. Куранов Б. А. Техника криогенная и криогенновакуумная «Сосуды и камеры». Нормы и методы расчёта на прочность, устойчивость и долговечность сварных конструкций ОСТ 26-04-2585-85, раздел 2.4. / Б. А. Куранов, В. М. Муратов, А. Г. Турбаивский, А. С. Цыбенко, Н. Г. Кришук и др. – М.: Миннефтехиммаш СССР.

Поступила в редколлегию 20.04.2006.