

In the article one may find the new diagnostics method of the operating conditions of loaded valve parts assigned to NPP. The method was developed by Kiev specialists on the basis of complex experiment-calculated method.

Прочностные критерии технического состояния нагруженных деталей трубопроводной арматуры АЭС. Методы расчетной и НК-диагностики

В.А. Ананьевский, ООО «НИИЦА», С.В. Луговской, ООО «А-ЭмД» (Киев, Украина)

Критерием конструктивной прочности корпусных (оболочечных) деталей и других тяжело нагруженных деталей является условие

$$\sigma_{\text{действ.}} \leq [\sigma] \quad (1)$$

либо

$$\sigma_{-1} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где:

$\sigma_{\text{действ.}}$ – напряжение в любой точке (сечении) конструкции, включая значение максимальных напряжений;

σ_{-1} – предел усталости при симметричном цикле нагружения;

$[\sigma]$ – допускаемые напряжения, регламентируемые НД или КД на изделие.

В ПНАЭГ-7-002-86 «Расчет на прочность» приняты значения кратковременных характеристик прочности σ_B , $\sigma_{0,2}$, полученных при растяжении, в зависимости от которых регламентируются допускаемые напряжения.

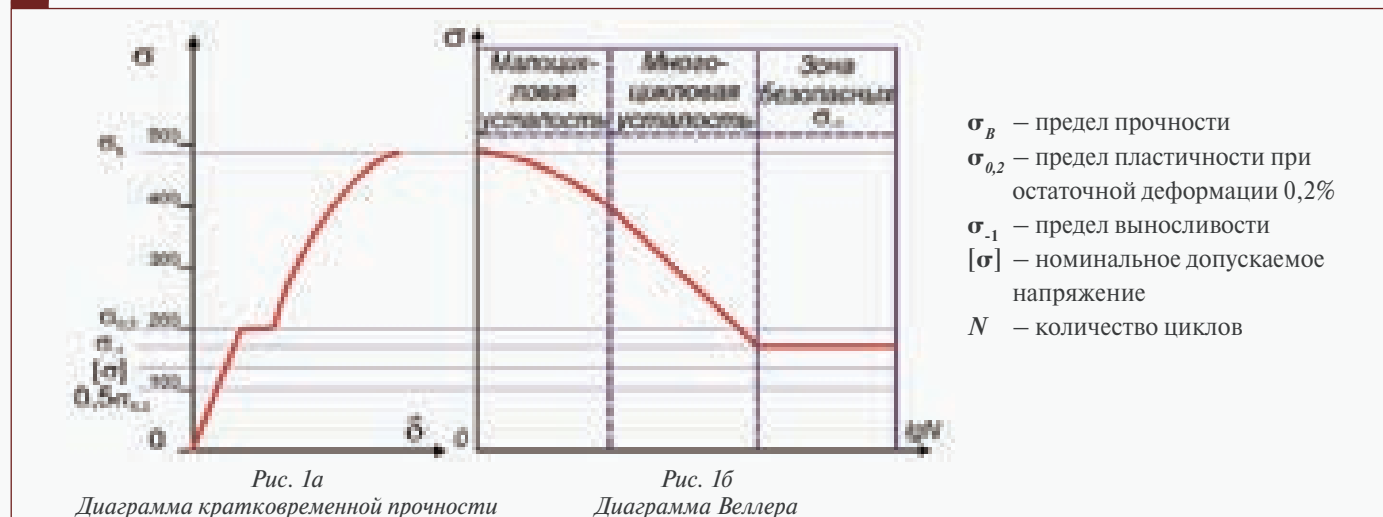
$$[\sigma] = \text{MIN} \{ \sigma_B / 2,6; \sigma_{0,2} / 1,5 \} \quad (3)$$

В действительности на конструкции ТА действуют еще и циклическое нагружение (от усилия уплотнения в затворе «открыто-закрыто», гидростатического давления среды, усилия на патрубки).

На *рис. 1а* представлена упрощенная диаграмма напряжение – деформация стали 12Х12Н10Т (характеристики кратковременной прочности), а на *рис. 1б* – диаграмма $\sigma - N$ (диаграмма Веллера или диаграмма циклической прочности) для той же стали.

Сравнение обеих диаграмм выявляет интересную закономерность. Допускаемое напряжение $[\sigma]$ находится в зоне значений напряжений меньше σ_{-1} . Эта зона называется зоной микропластичности. По величине напряжений эта зона ориентировочно равна $\sim 0,5\sigma_{0,2}$, т.е. соответствует величинам микронапряжений, при которых происходит развитие сдвиговых явлений в кристаллах и зернах, активизация дислокационных процессов, и по существу является инкубационным

Рис. 1.



периодом разрушения с возможным образованием субмикротрещин. Сам факт образования субмикротрещин интересен и тем, что если не увеличивать напряжение в условиях цикличности, то развитие микротрещин не получит дальнейшего развития, о чем свидетельствуют экспериментальные данные многоциклового и малоциклового усталости, а также проводимые нами результаты экспериментальной обработки и измерения напряжений с помощью методов акустической эмиссии (АЭ).

Это подтверждается также расчетами накопленной повреждаемости в этой зоне (например, с помощью ПК «ЦИКЛ»), показывающими полное отсутствие повреждаемости в зоне микропластичности. Уровень микронапряжений в зоне микропластичности соответствует напряжениям 1-го и 2-го рода (структурные напряжения), хотя имеют место и макронапряжения (3-го рода), приводящие к остаточной деформации $\delta \approx 0,001$ и меньше. Естественно, стандартные методы диаграмм $\sigma - \delta$ и соответствующие приборы нечувствительны к такому уровню микронапряжений. Напряжения 1-го и 2-го рода могут быть обнаружены только с помощью рентгеноспектральных методов [1].

С другой стороны, существующие методы АЭ диагностики, например, с помощью серийных приборов, рассчитаны на регистрацию акустических сигналов, соответствующих напряжений $> \sigma_{0,2}$, вплоть до разрушений, и не приспособлены к фиксации малых микронапряжений.

Поэтому задача определения численных значений прочностных критериев, подтверждающих работоспособное техническое состояние ТА, по нашему мнению, сводится к решению следующих задач:

а) Расчетному определению распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) во всех точках и сечениях конструкции, с помощью конечно-элементных программных комплексов (ПК). В нашем случае применяется ПК «CAN», краткая характеристика приведена ниже.

б) В местах конструкций, где расчетные напряжения выше допустимых напряжений, проводится экспериментальное измерение напряжений. Рекомендуется совместное применение методов АЭ и магнитной памяти металлов (МПМ), измеряется уровень напряжения (контрольные проверки расчетных методов).

Пункты а) и б) лягут в основу обрабатываемой в настоящее время соответствующей методики. И, наконец, если значения напряжений, полученных расчетными и экспериментальными методами, выше $\sigma_{0,2}$ и находятся в зоне многоциклового и малоциклового усталости, то производятся дополнительные расчеты накопленных повреждений в зонах максимальных напряжений с помощью, например, ПК «ЦИКЛ». Если расчет показал возможное образование повреждений, то обязательно в этой зоне (точке) НДС проводится УЗК – контроль, после чего принимается решение о дальнейшей эксплуатации ТА. Хотя этот случай не должен допускаться, учитывая низкий расчетный допустимый уровень напряжений.

Ниже приводится описание расчетных и экспериментальных методов оценки прочностных критериев, проводимых авторами этой статьи в ООО «НИИЦА» и ООО «А-ЭмД».

Расчет НДС конструкций и визуализация напряжений во всех точках сечения деталей производился с помощью конечно-элементного комплекса на основе метода перемещений ПК «CAN», разработанного ИУП МАЭ, дочерней организацией ВНИКИЭТ им. Доллежалея. ПК «ЦИКЛ» также разработан этой организацией.

Характеристики ПК «CAN»:

1. В CAN реализованы различные виды воздействий (точечные и распределенные силы, давление, вес, инерционные и температурные нагрузки, комбинированное нагружение) и модели деформирования (упругие, пластические, упруго-вязко-пластические, изотропные, ортотропные и др.).

2. Комплекс может использоваться при расчете:

- а) напряженно-деформированного состояния;
- б) стационарной и нестационарной теплопроводности;
- в) частот и форм собственных колебаний;
- г) динамического отклика при различных типах возбуждения, включая сейсмическое;
- д) критических нагрузок и форм потери устойчивости тонкостенных конструкций;
- е) стационарного и нестационарного термомеханического состояния;
- ж) остаточных напряжений, возникающих при технологических операциях;
- з) коэффициентов концентрации напряжений и деформаций;
- и) поэтажных акселерограмм и спектров ответа при сейсмическом воздействии.

Комплекс прошел верификацию (имеется более 500 примеров) и аттестацию в Госгортехнадзоре РФ Научно-техническим центром по ядерной и национальной безопасности РФ.

На рис. 2 показана схема нагружения одной из задвижек, установленной на РАЭС, а на рис. 3 – визуализация результатов расчета НДС.

Рис. 2. Схема нагружения задвижки

- P_p – рабочее давление
- F_y – усилие уплотнения
- F_k – усилие от давления в трубопроводе
- F, M – нагрузки от веса трубопровода

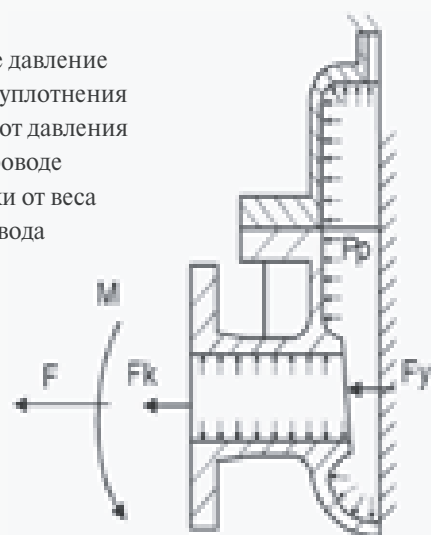
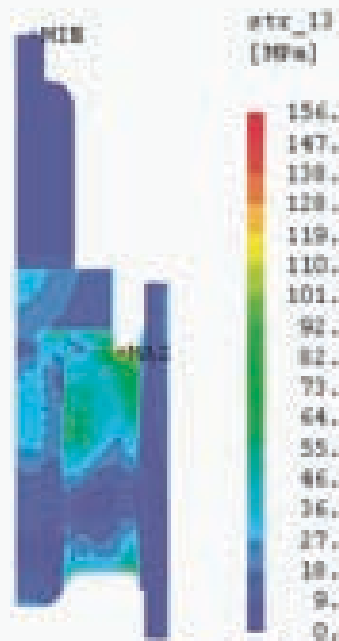


Рис. 3. Визуализация результатов расчета НДС

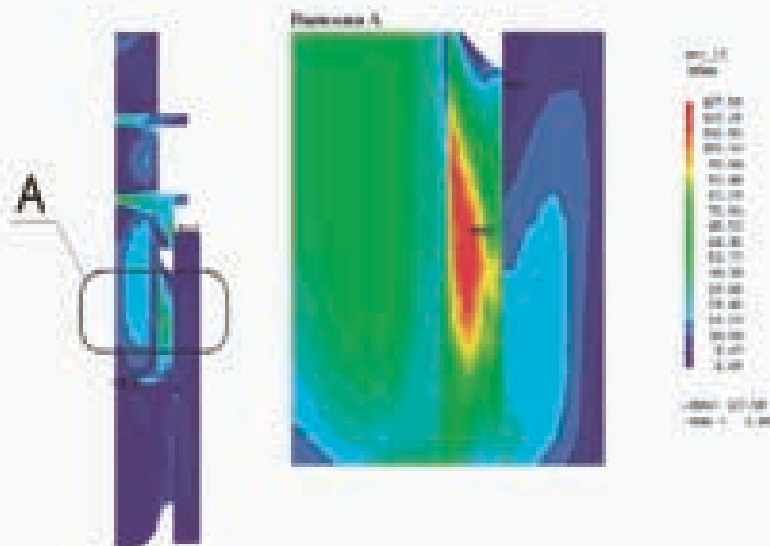
Максимальное действующее напряжение $\sigma = 153$ МПа.
 При этом предел пластичности $\sigma_{0,2} = 200$ МПа, предел выносливости $\sigma_{-1} = 160$ МПа, а допускаемое напряжение составляет $[\sigma] = 131$ МПа.
 Несмотря на некоторое превышение $\sigma_{\text{действ.}}$ над $[\sigma]$, вычисленное напряжение находится в зоне микропластичности $[\sigma] < \sigma_{\text{действ.}} < \sigma_{-1} \leq \sigma_{0,2}$



Интерес представлял вопрос соответствия расчетных и экспериментальных значений НДС. Несмотря на то, что CAN был верифицирован более чем в 500 примерах, нами совместно с ИПП НАУ была проведена работа по сопоставлению величин напряжений, полученных расчетным путем (CAN) и экспериментальным с помощью разработанной в ИПП информационно-измерительной тензометрической системы (ИИС) измерения напряжений. Эксперименты проводились на задвижке DN 200 в местах наибольших напряжений на корпусах и в зоне затвора в нескольких точках.

На рис. 4 приведены данные расчета и измерения в одной из точек. Диапазон расхождения расчетных и экспериментальных результатов лежал в пределах до 5%.

Рис. 4. Результат тензометрии максимума указанного на выносе А задвижки ИА 11095-300 в ИПП составил 125 МПа



В качестве приборных (инструментальных) методов НК-диагностики НДС в зоне микропластичности могут быть использованы метод магнитной памяти металлов (МПМ), разработанный ООО «Электродиагностика» (г. Москва) под руководством А.А. Дубова и В.Т. Власова [2], и новые методы АЭ.

Метод МПМ основан на использовании собственного магнитного поля рассеяния (СМПР), образующегося в зонах деформации под действием рабочих нагрузок. Физические основы возникновения СМПР принципиально другие в сравнении с магнитными полями рассеяния (МПР), образующимися на дефектах изделий при их искусственном намагничивании, – методе, используемом в известных магнитных методиках НК. СМПР возникает в локальных зонах (0,1 до десятков микрометров) структуры металла и на поверхности и в глубинах слоя металла изделий, в зонах деформации. Возникновение СМПР объясняется формированием доменных границ на скоплениях дислокаций высокой плотности. При этом даже в парамагнитных материалах (например, нержавеющей стали аустенитного класса) обнаруживается эффект СМПР.

При увеличении плотности дислокации, близкой к критическому значению, т.е. возможности возникновения субмикротрещины, происходит переполсовка магнитного поля (Н) СМПР, образуются линии $H_p = 0$. Это явление соответствует ориентировочно $\sigma_{\text{действ.}} \approx 0,3\sigma_{0,2}$. И хотя метод не указывает конкретных значений НДС для исследуемых участков, появление линий $H_p = 0$ косвенно свидетельствует о начале образования субмикротрещин. Указанные эффекты необходимо идентифицировать с расчетным НДС и результатами АЭ диагностики.

Все измерения по методу МПМ могут производиться на корпусах арматуры непосредственно «на объекте», т.е. без демонтажа и разборки арматуры. Не требуется подготовка поверхности деталей, на которых производится диагностирование.

Как говорилось выше, существующие методы АЭ и их приборное оснащение в основном предназначены для диагностики механических напряжений, превышающих $\sigma_{0,2}$, когда интенсивно «звучат» трещины и др. макродефекты. Кроме того, существующие методы АЭ в полной мере не могут «расслышать» фазу образования и распространения субмикротрещин вследствие высокого уровня собственных шумов аппаратуры (до 5 мкВ) (17–18 дБ), а также из-за фоновых шумов (от 17 дБ). Повышение эффективности АЭ-контроля с целью обнаружения малых пластических деформаций на их ранних стадиях возможно при совершенствовании аппаратуры контроля. Однако, повышение чувствительности аппаратуры не решает этой проблемы – необходимо техническое

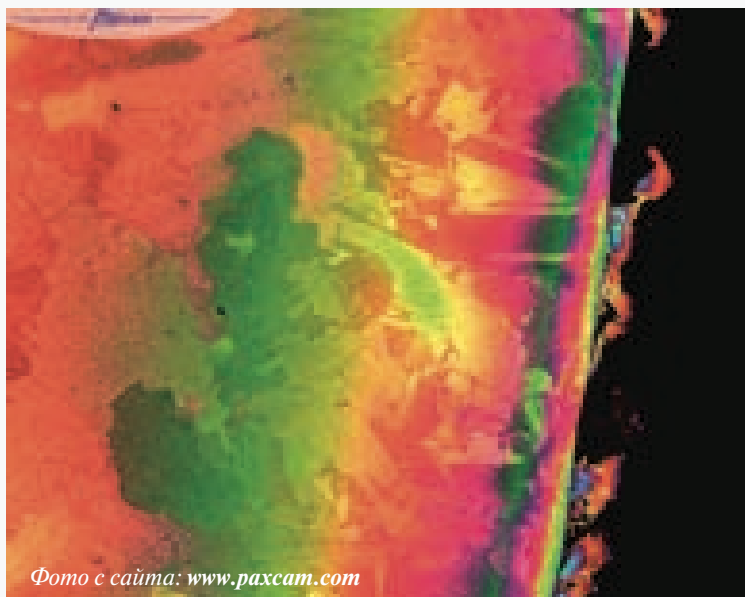


Фото с сайта: www.paxcam.com

решение по снижению собственных и фоновых шумов. При этом имеются обнадеживающие результаты — для ряда материалов уровень АЭ-сигналов при малых степенях пластической деформации находится выше уровня фоновых шумов, что позволит с большой достоверностью определять начальную стадию разрушения.

В настоящее время нашими организациями совместно с Институтом Проблем Прочности Национальной Академии Наук Украины (ИПП НАНУ) проводится отработка комплексной методики расчета НДС, с последующим измерением напряжений, близких к уровню микропластических деформаций, с привлечением современных инструментальных средств АЭ, разработанных «А-ЭмД», методов тензометрии и МПМ с целью идентификации измерений и сопоставления их с результатами расчетной диагностики НДС, о которой говорилось выше.

Методику предполагается утвердить в контролирующих органах, что даст возможность осуществлять периодическое определение прочностных критериев работоспособного технического состояния на АЭС.

Результаты проводимых работ после их завершения будут опубликованы в журнале «Арматуростроение».

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

1. Ананьевская Л.В., Рыкунич Ю.Н. Методические аспекты оценки степени деградации материалов при определении остаточного ресурса арматуры АЭС (см. стр. 73).

2. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. Москва, 2004, изд. «ТИССО», 425 с.