

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.179+620.17+620.182

А.Л. Руденко¹, А.А. Миронов², В.В. Мишакин³, А.В. Гончар³

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ ЛОПАТОК НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ГЭС ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ДП АО «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго», г. Набережные Челны¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород³

Приведены результаты исследования состояния лопаток направляющего аппарата (НА) ГЭС после их длительной эксплуатации. С помощью метода акустической томографии получено распределение дефектов по размерам в сварных швах и профиль обратной поверхности пера лопаток. Получены характеристики коррозионной поврежденности.

Рассчитаны скорости роста трещин с учетом НДС и коррозионной поврежденности. Произведена оценка ресурса до достижения критического состояния пера лопатки.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, лопатки направляющего аппарата, дефекты сварных соединений, коррозия, напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость, ресурс.

Одним из основных элементов гидротурбины является направляющий аппарат, обеспечивающий необходимое направление потока воды на входе в рабочее колесо турбины и регулирующий расход воды. Он выполнен в виде системы лопаток, поворачивающихся вокруг своих осей с помощью специального привода. Синхронность поворота лопаток обеспечивается регулирующим кольцом, с которым все лопатки связаны шарнирно с помощью рычагов и серег.

Как правило, лопатки НА находятся длительное время в эксплуатации. Например, лопатки некоторых агрегатов на Нижнекамской ГЭС до ремонта проработали 32 года, на Жигулевской ГЭС около 50 лет. Лопатки НА подвержены статическим и динамическим нагрузкам, которые могут приводить к образованию эксплуатационных и развитию технологических дефектов, например, дефектов сварки. Для эффективного восстановления лопаток и обеспечения их безопасной работы необходимо выполнить комплекс исследований, включающий контроль дефектов, как на поверхности изделия, так и в объеме материала, анализ напряженно-деформированного состояния (НДС), определение распределения дефектов по размерам и ориентации, оценку скорости развития существующих дефектов в поле напряжений с учетом коррозионной поврежденности.

Исследования, проведенные на лопатках (всего 28 штук) Нижнекамской ГЭС, находившихся на восстановлении на территории предприятия ДП АО «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго» в г. Набережные Челны, показали, что в местах сварного соединения верхней и нижней цапфы с пером на 82% лопаток обнаружены макродефекты в виде непроваров и пор, а также другие дефекты. Внешний вид исследуемых лопаток Нижнекамской ГЭС приведен на рис. 1. Длина лопаток – 6350 мм, вес каждой лопатки – 7536 кг.

Исследования сварных соединений проводили с помощью акустического томографа OmniScan MX-PA1664M и портативного комплекса для металлографического анализа МИК-РОКОН МЕТ. Поверхностные трещины исследовали магнитопорошковым методом. На рис. 2 в качестве примера представлены изображения дефектов, выполненные в режиме ли-

нейного сканирования сварных соединений пера лопатки и цапфы прибором OmniScan MX-PA1664M. На горизонтальной оси отложено расположение дефектов в миллиметре от торца лопатки, на вертикальной – расстояние по толщине шва. При толщине пера лопатки 40 мм погрешность измерения размеров дефектов составляла около 2 мм.

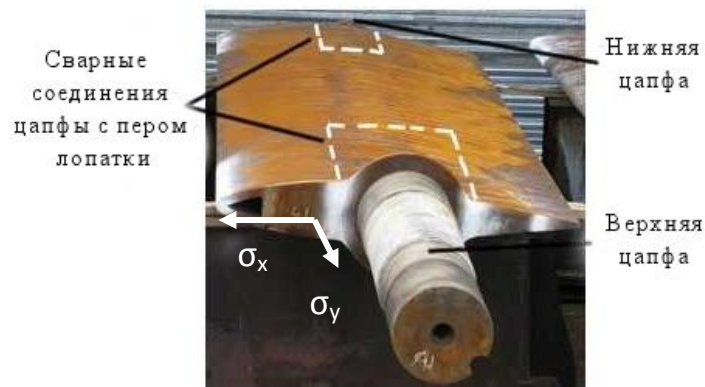


Рис. 1. Вид исследуемых лопаток

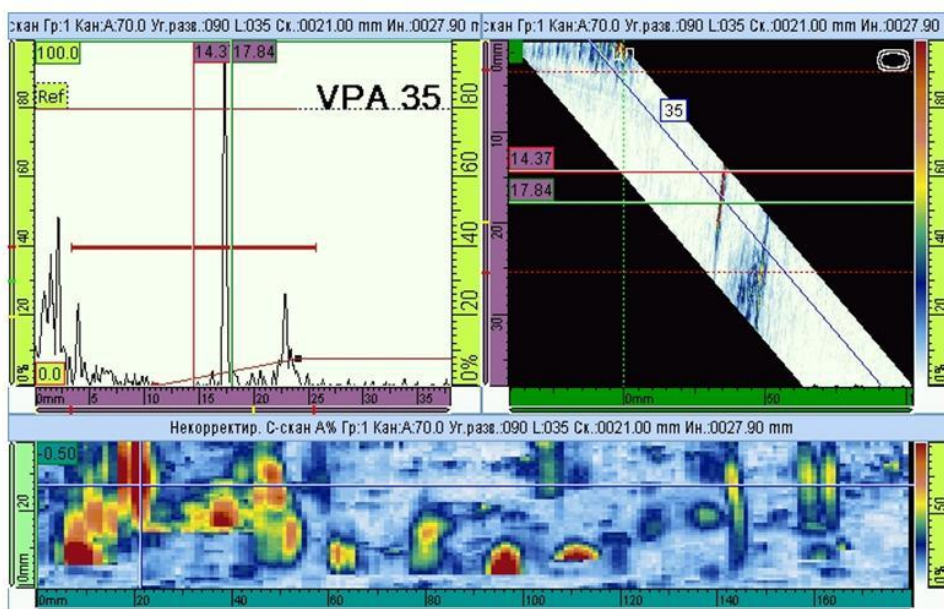


Рис. 2. Изображения дефектов, выполненных в режиме линейного сканирования сварных соединений пера лопатки



Рис. 3. Трещины в районе сварного соединения пера лопатки с цапфой

Обнаружено, что отдельные дефекты имеют значительный размер (до 50 мм и более). В ряде случаев, размеры трещины пересекают толщину пера лопатки и выходят на поверхность. На рис. 3 представлена трещина в районе стыка пера лопатки с цапфой, обнаруженная с помощью магнитопорошковой дефектоскопии.

Трещины развивались, как правило, от дефектов сварки в местах стыка пера лопатки и цапфы. Плоскость трещин направлена вдоль оси сварного шва. Появление трещин в этих местах связано, по-видимому, с тем, что приложение крутящего момента на цапфу при эксплуатации лопаток приводит к повышенной концентрации напряжений в местах, близких к имеющему дефекты сварки соединению цапфы с пером лопатки.

Металлографические исследования показали, что основными дефектами сварки являются несплавления и поры (рис. 4).

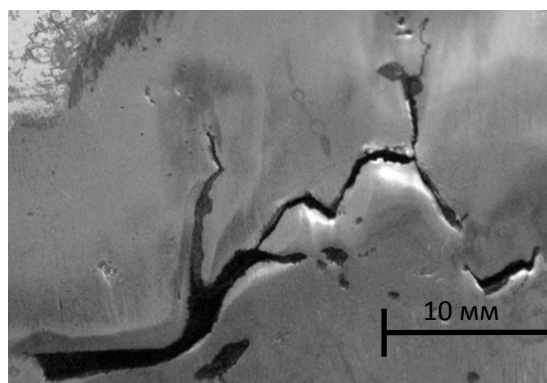


Рис.4. Фотография поверхности с дефектами сварки

Обнаружено, что от некоторых трещиноподобных дефектов и пор развиваются усталостные трещины (рис. 5). Необходимо отметить, что трещины развивались в условиях коррозионной среды, что существенно увеличивало скорость их роста.

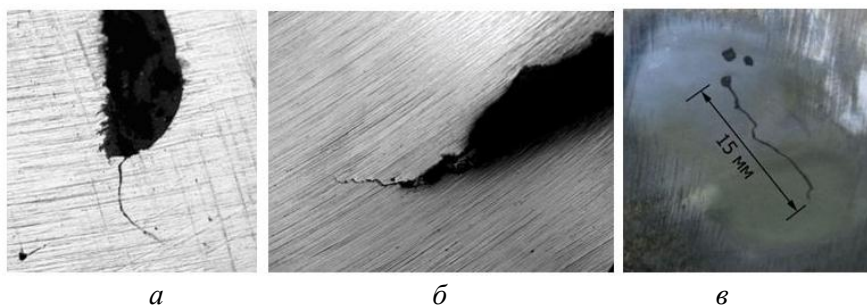


Рис. 5. Развитие трещин от дефектов сварки:

а, б – развитие трещины от непроваров (*а* – увеличение $\times 75$; *б* – увеличение $\times 150$);
в – развитие трещины от поры

Вскрытие одной из трещин показало, что берега имеют характерные участки (рис. 6). Участок, показанный на рис. 6, *а* – начало трещины от концентратора, которым являлся непровар в корне шва. Относительно гладкий участок, представленный на рис. 6, *б*, предположительно образовался при медленном продвижении трещины в процессе усталостного разрушения. Более детальный рельеф (наличие усталостных бороздок) затенен процессом коррозии. Поверхность, соответствующая нестабильному распространению трещины (участок, показанный на рис. 6, *в*), имеет грубый, волокнистый рельеф. Участок мог сформироваться при достижении в месте концентрации напряжений величины критического значения коэф-

фициента интенсивности напряжений (КИН), что вызвало нестабильный характер распространения трещины. Остановку трещины можно объяснить её выходом из области концентрации напряжений. Участок, представленный на рис. 6, *з*, соответствует долому при приготовлении образца.

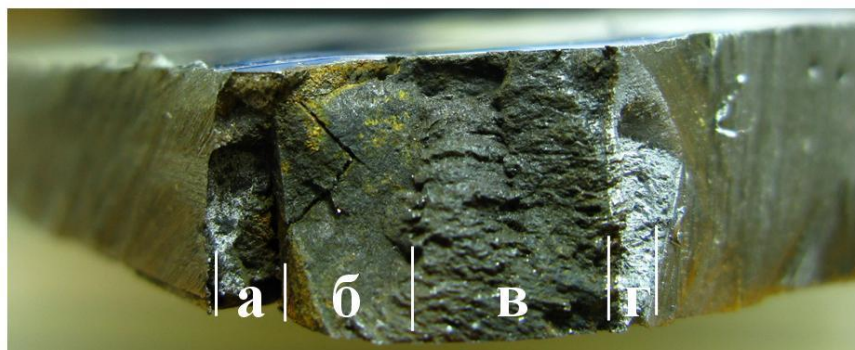


Рис. 6. Фотография поверхности излома:

а – дефект сварки; *б* – поверхность, соответствующая стабильному распространению усталостной трещины; *в* – участок нестабильного распространения трещины; *г* – участок долома при приготовлении образца

На рис. 7 показана средняя протяженность дефектов на каждые 100 мм шва по мере удаления от края пера лопатки, к которому этот шов прилегает.

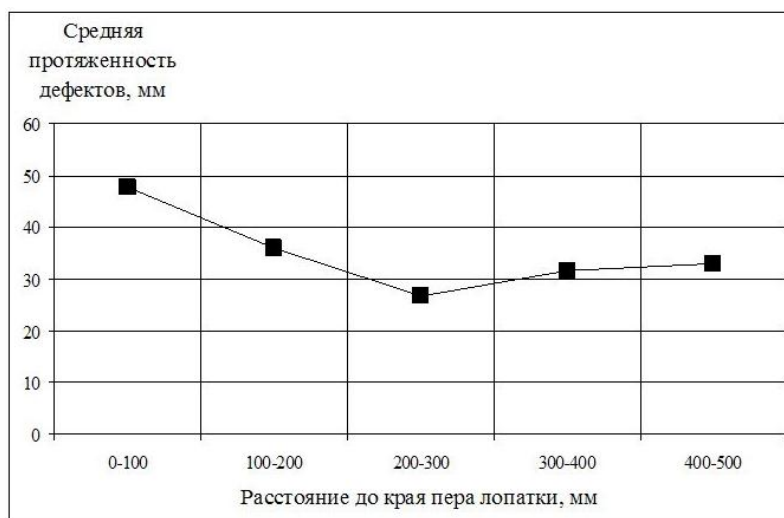


Рис. 7. Средняя протяженность дефектов в зависимости от расстояния до края лопатки

Как видно из рис. 7, наиболее дефектные участки сварных швов находятся вблизи торцов пера лопатки. Средняя протяженность дефектов составляет 35 мм на каждые 100 мм длины сварного шва. Большая плотность дефектов увеличивает вероятность их объединения и последующего разрушения изделия, особенно при повышении эксплуатационных нагрузок (наборе мощности гидроагрегатом).

Методом конечных элементов был выполнен расчет НДС лопатки направляющего аппарата в условиях гидроудара с максимальным давлением на лопатку $P = 0,27$ МПа и приложении максимального крутящего момента 27,5 т·м, создаваемого с помощью сервомоторов. Величина максимального давления на лопатку и максимальный крутящий момент соответствовали данным, используемым при расчете на прочность лопаток направляющего аппарата Нижнекамской ГЭС. Конечно-элементная (КЭ) схема конструкции приведена на рис. 8.

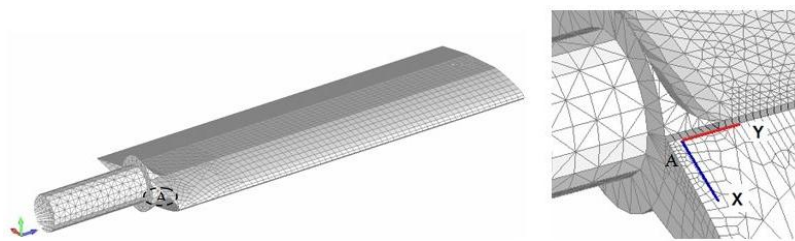
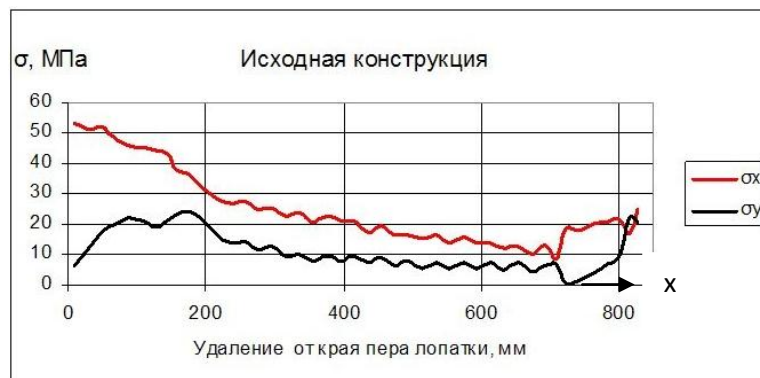


Рис. 8. КЭ схема конструкции

На рис. 9 приведено распределение напряжений σ_x и σ_y вдоль сварного шва.

Рис. 9. Распределение напряжений σ_x и σ_y вдоль сварного шва

Необходимо отметить, что в процессе длительной эксплуатации активно развивалась коррозионная поврежденность. Наряду с отдельными язвами поверхности пера и цапф на некоторых лопатках были обнаружены области, в которых толщина стенок пера лопатки существенно уменьшалась относительно номинального значения 40 мм. Для отдельных лопаток была выполнена акустическая толщинометрия стенок пера лопатки с помощью прибора УИУ-Сканер и получен профиль обратной поверхности пера лопатки. Результаты измерений толщины приведены в табл. 1 (h_{\min} и h_{\max} – максимальное и минимальное значение толщины).

Таблица 1

№	h_{\min} , мм	h_{\max} , мм	Максимальное относительное уменьшение толщины стенки по сравнению с номинальной, %
1	32,1	40,1	20
2	35,4	41,4	12
3	32,1	41,7	20
4	34,0	41,2	15
5	35,9	40,5	10

Средняя скорость коррозии стенки пера лопатки с учетом срока эксплуатации 32 года равна $0,14 \pm 0,3$ мм/год. Изменение живого сечения в отдельных местах в результате коррозии доходит до 20%, что необходимо учитывать при оценке ресурса изделия.

В качестве примера на рис.10 показана фактическая толщина стенки пера одной из лопаток вдоль сварного шва, измеренная акустическим методом. Максимальная толщина стенки лопатки на некоторых участках приближается к номинальному значению 40 мм, минимальное значение составило 32,5 мм. Отклонение размеров живого сечения от номинального подчиняется нормальному закону распределения.

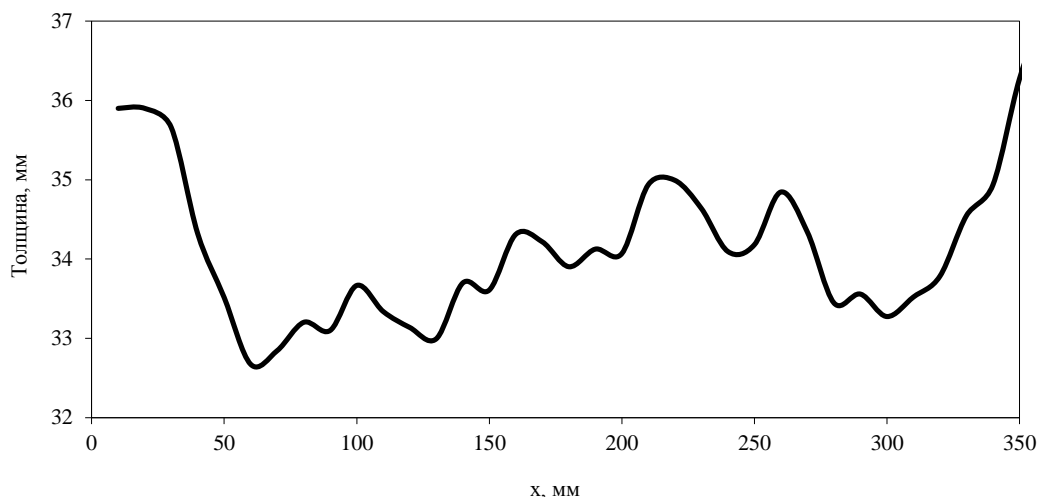


Рис. 10. Распределение фактической толщины стенки пера лопатки вдоль сварного шва

Эффективное напряжение $\sigma(x)$ с учетом уменьшения толщины стенки лопатки в результате коррозионной поврежденности рассчитывалось по формуле:

$$\sigma(x) = \frac{\sigma_0(x)}{1 - \frac{h_0 - h(x)}{h_0}}, \quad (1)$$

где $\sigma_0(x)$ – распределение напряжений без учета коррозии; h_0 – начальное значение толщины стенки лопатки; h – толщина стенки лопатки по результатам замеров.

На рис. 11 приведено распределение напряжений с учетом коррозионной поврежденности и без ее учета.

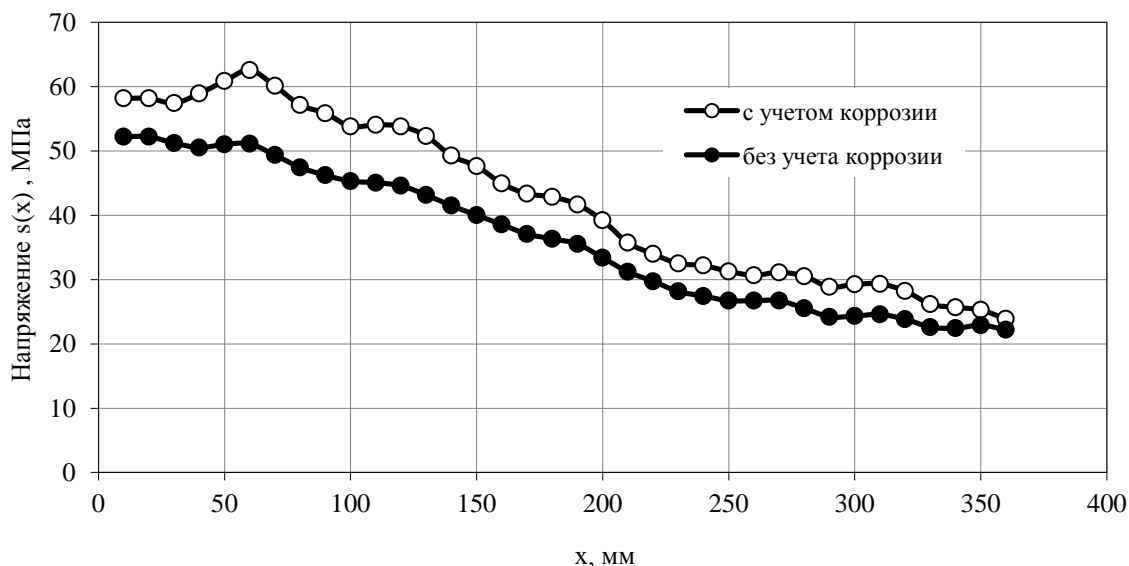


Рис. 11. Распределение напряжений вдоль пера лопатки с учетом и без учета коррозионной поврежденности

Натурные исследования показали, что выработка ресурса конструкции лопаток происходит при совместном действии двух механизмов – коррозии и усталостного разрушения. Для оценки остаточного ресурса необходимо разработать расчетную модель, учитывающую совместное действие указанных механизмов.

Процесс коррозии приводит к увеличению эффективного напряжения и снижению показателей циклической трещиностойкости металла. С учетом средней величины скорости коррозионного износа v_k выражение для эффективного напряжения можно представить в виде:

$$\sigma(x, t) = \sigma_0(x) \frac{h_0}{(h(x) - v_k t)}. \quad (2)$$

Для описания скорости роста усталостной трещины используем уравнение Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (3)$$

где a - длина трещины; C и m - характеристики циклической трещиностойкости металла, определяемые с учетом влияния коррозионной среды; ΔK - размах КИН нормального отрыва.

Решение для КИН в исследуемом случае краевой трещины может быть получено на основе метода суперпозиции, в рамках которого рассматривается трещина, к берегам которой приложено напряжение, определяемое зависимостью (2). Выражение для КИН получим интегрированием решения [2] для случая действия на берегах краевой трещины элементарных сосредоточенных сил $dP = \sigma(x, t)dx$:

$$K(a, t) = \int_0^a \sigma(x, t) F(a, x) dx, \quad (4)$$

где $F(a, x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1 + f(x/a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} \sqrt{a}$,

$$f(a/x) = \left[1 - (a/x)^2 \right] \left[0,2945 - 0,3912(a/x)^2 + 0,7685(a/x)^4 - 0,9942(a/x)^6 + 0,5094(a/x)^8 \right].$$

Введение среднего значения числа циклов нагружения в год n позволяет записать (3) в виде дифференциального уравнения, описывающего изменение длины усталостной трещины во времени:

$$\frac{da}{dt} = nC[\Delta K(a, t)]^m. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (5) осуществляется при начальных условиях $t = 0$, $a = a_0$. Остаточный ресурс конструкции t_p соответствует моменту времени достижения трещиной критического размера a_c , определяемого из критерия разрушения:

$$K_{\max}(t_p, a_c) = K_{fc},$$

где K_{fc} - циклическая вязкость разрушения металла.

Разделение переменных в выражении (2) позволяет построить расчетную модель, не требующую интегрирования уравнения (5). Представим зависимость эффективного напряжения от времени в виде:

$$\sigma(x, t) = \sigma(x)\varphi(t), \quad (6)$$

где $\sigma(x) = \sigma_0(x)h_0/h(x)$, $\varphi(t) = \frac{1}{[1 - v_k t/h_{\min}]}$, h_{\min} - минимальное значение толщины по результатам измерений.

С учетом (6) выражение (4) для КИН примет вид:

$$\Delta K(a,t) = K(a)\varphi(t),$$

где $K(a) = \int_0^a \sigma(x)F(a,x)dx$.

После разделения переменных в (5) получим уравнение для определения остаточного ресурса t_p , входящего в верхние пределы интегралов:

$$\int_{a_0}^{a_c(t_p)} \frac{1}{C[\Delta K(a)]^m} da = n \int_0^{t_p} \varphi(t)^m dt. \quad (7)$$

Выполнены расчеты остаточного ресурса лопаток по выражению (7) при варьировании начального размера трещины a_0 и числа циклов нагружения в год n . В расчетах приняты следующие характеристики сварного соединения стали Ст3: $K_{fc} \approx K_{Ic} = 125 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$, $C = 8,9 \cdot 10^{-8}$ (принято с учетом влияния коррозионной среды), $m = 3,45$. В расчетах использован коэффициент запаса по вязкости разрушения $n_K = 3$. Результаты расчетов представлены на рис. 12.

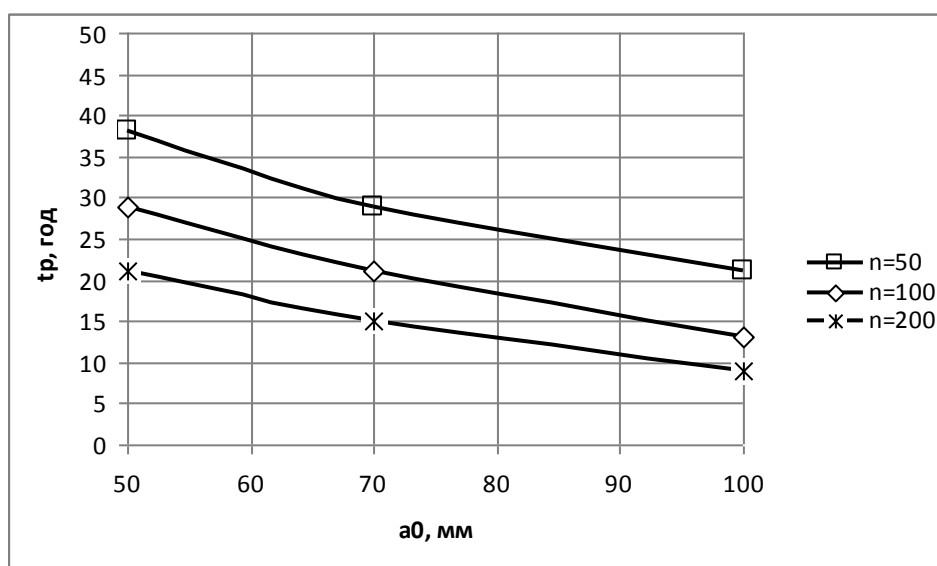


Рис. 12. Зависимость остаточного ресурса лопаток от начального размера трещины

Трещины, зафиксированные на лопатках Нижнекамской ГЭС, отработавших более 32 лет, и на Жигулевской ГЭС, отработавших около 50 лет, достигали размеров соответственно 50 мм и 100 мм. Как видно из рисунка, остаточный ресурс лопаток без серьезных восстановительных мероприятий может быть ограничен до 9 лет.

Таким образом, привлечение средств неразрушающего контроля дефектности сварных соединений лопаток направляющего аппарата в сочетании с металлографическими исследованиями непосредственно на элементе конструкции позволило определить размеры, расположение и распределение дефектов по размерам, установить факт образования и развития трещин от трещиноподобных дефектов сварки в процессе длительной эксплуатации. Исследования характеристики коррозионной поврежденности лопаток НА акустическим методом позволило произвести оценочные расчеты остаточного ресурса изделия с учетом скорости роста трещин и скорости коррозии.

Библиографический список

1. Херцберг, Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р.В. Херцберг. – М.: Металлургия, 1989. – 576 с.
2. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: [пер. с англ.]: в 2 т. / Ю. Мураками [и др.]. – М.: Мир, 1990. – 448 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.01.2015*

A.L. Rudenko, A.A. Mironov, V.V. Mishakin, A.V. Gonchar

INVESTIGATION OF HPP GUIDE BLADES DEFECTS DEVELOPMENT AFTER A PROLONGED USE

DP JSC "VOLGA-SGAM" "Camspecanergo", Nabere zhnye, embankments Chelny,
Nizhny Novgorod state technical University n.a. R. E. Alexeev,
Institute of problems of mechanical engineering RAS, Nizhny Novgorod

The result of the research by nondestructive testing methods of HPP guide blades in operation for a long period of time is given.

Distribution of defects with respect to welds size and profile of the back surface of the blades was obtained by acoustic tomography. Characteristics of corrosive damage were found. Cracks growth rate with the stress condition and corrosion damage taken into account was calculated. Blades life-time before reaching a critical state was estimated.

Key words: nondestructive testing, HPP hydroturbine's guide blades, defects of welded joints, corrosion, stress-strain state, fracture, resource.