УДК 620.179+620.17+620.182

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ГИДРОАГРЕГАТА ГЭС ПОСЛЕ ИХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© Александр Леонидович Руденко[1], Александр Иванович Байков[1], Василий Васильевич Мишакин[2], Светлана Александровна Сорокина[3], Вячеслав Александрович Клюшников[2]

[1]ДП АО «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго», Набережные Челны, Россия
[2]Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Нижний Новгород, Россия
[3]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия
ral-1@mail.ru

Аннотация. *Представлены результаты исследования структурного состояния и механических свойств материала лопаток направляющего аппарата гидроагрегата ГЭС после длительной эксплуатации, а также результаты ультразвукового контроля дефектов сварных соединений лопаток.*

Ключевые слова: *Механические свойства, структурное состояние, неразрушающий контроль, лопатки направляющего аппарата, дефекты сварки.*

COMPLEX STUDY OF CONDITION OF HPP HYDRO-UNIT GUIDE VANES AFTER LONG-TIME EXPLOITATION

© A.L. Rudenko[1], A.I. Baykov[1], V.V. Mishakin[2], S.A. Sorokina[3], V.A. Klyushnikov[2]

[1] JSC "Volga-SGEM" "Kamspetsenergo" Naberezhnye Chelny, Russia
[2] The Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod Branch, Russia
[3]RE Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. *The results of study of the structural condition and mechanical properties of HPP hydro-unit guide vanes after their long-time exploitation and the results of ultrasonic control of defects of vanes' welded joints were presented.*

Key words: *Mechanical properties, structural condition, non-destructive testing, guide vanes, welding defects.*

Важными элементами энергетических установок являются лопатки направляющего аппарата гидроагрегата ГЭС, обеспечивающие регулируемый ток воды на лопасти гидротурбин. В работе представлены результаты исследования структурного состояния, механических свойств, химического состава материала лопаток после их длительной эксплуатации. В качестве объекта исследования были выбраны лопатки Нижнекамской ГЭС, находившиеся на восстановлении на территории предприятия «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго» г. Набережные Челны. Лопатки были в эксплуатации 30 лет. Комплексное исследование заключалось в определении структурного состояния, механических свойств, химического состава материала лопаток. Осуществлялся также магнитопорошковый контроль дефектов на поверхности изделий и выявление объемных дефектов с помощью акустического метода в районе сварных швов.

Схема напряженно-деформированного состояния лопаток и условия эксплуатации таковы, что наряду со статическими нагрузками возникают циклические, которые могут приводить в конечном итоге, после длительной эксплуатации, к усталостному разрушению. Целью исследования было также выявление характера развития дефектов в процессе длительной эксплуатации.

На рис.1 приведен внешний вид исследуемых лопаток. Длина лопаток – около 7 м, вес каждой лопатки – 7 тонн. Соединения нижней и верхней цапф с пером лопатки осуществляется с помощью сварки. Перо лопатки выполнено из гнутого катаного листа (Сталь ВСт3сп3) толщиной 40 мм.

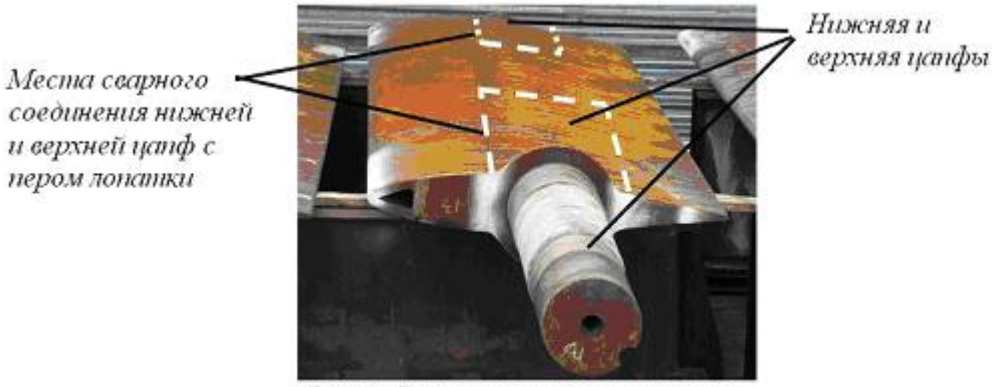


Рис. 1. Вид исследуемых лопаток.

Выборочный контроль химического состава материала проводился на образцах размерами 20х30 мм, вырезанных из трех лопаток. Контроль осуществлялся спектрометром DV-6. Получено, что химический состав материала соответствует стали ВСт3сп3 (ГОСТ 380-71) [1].

Исследования микроструктуры осуществлялось непосредственно на 28 лопатках с помощью переносного металлографического комплекса СПЕКТР-МЕТ. Микроскоп, входящий в этот комплекс, может располагаться на горизонтальных поверхностях и крепиться на вертикальных поверхностях контролируемых объектов. Как показали металлографические исследования, структура материала всех лопаток однородна, состоит из зерен перлита и феррита (рис. 2) и соответствует стали ВСт3сп3. Средний диаметр зерна составил 15 мкм. На одной из лопаток размер зерна составил 39 мкм. Повышенное значение размера зерна может отрицательно сказываться на механических свойствах материала.

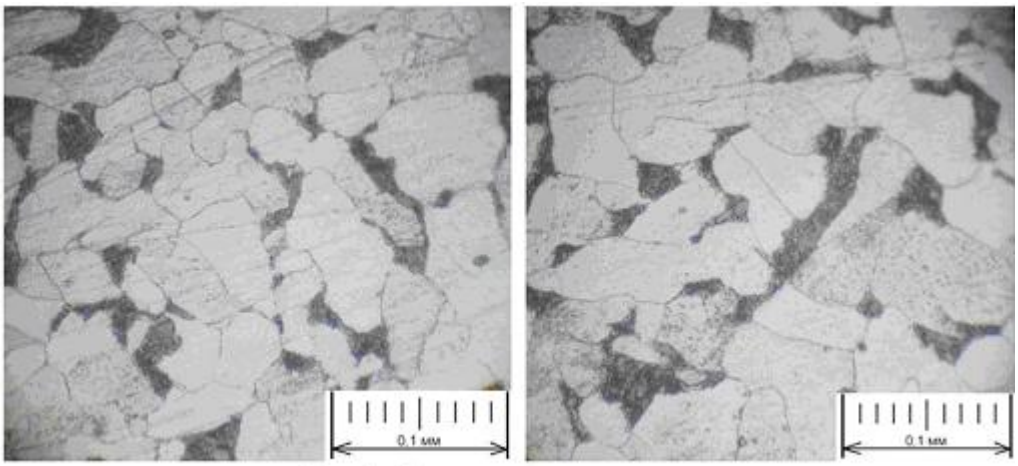


Рис. 2. Структура материала лопаток.

Из двух лопаток в районе выходной кромки был вырезан материал, из которого были изготовлены пропорциональные цилиндрические образцы (4 тип №5 ГОСТ 1497-84, образцы Гагарина) для проведения механических испытаний.

Нагружение проводилось на испытательной машине 2667Р-50 со скоростью 0,4 мм/мин при комнатной температуре.

Механические свойства испытанных образцов, за исключением условного предела текучести, соответствовали ГОСТу 380–71. Для стали В3Ст3сп предел текучести должен составлять не менее 235 МПа. Значение предела текучести, полученное по результатам механических испытаний, составляет 223–230 МПа.

Также была определена твердость материала лопаток. Значительных отклонений твердости не обнаружено. Среднее значение твердости материала лопаток по Бринеллю составляло 132 МПа. Твердость на лопатке с повышенным диаметром зерна минимальна (115-118 МПа).

Как показал предварительный осмотр лопаток, поиск поверхностных дефектов в местах, обозначенных на карте магнитопорошкового контроля (рис. 3), недостаточен.

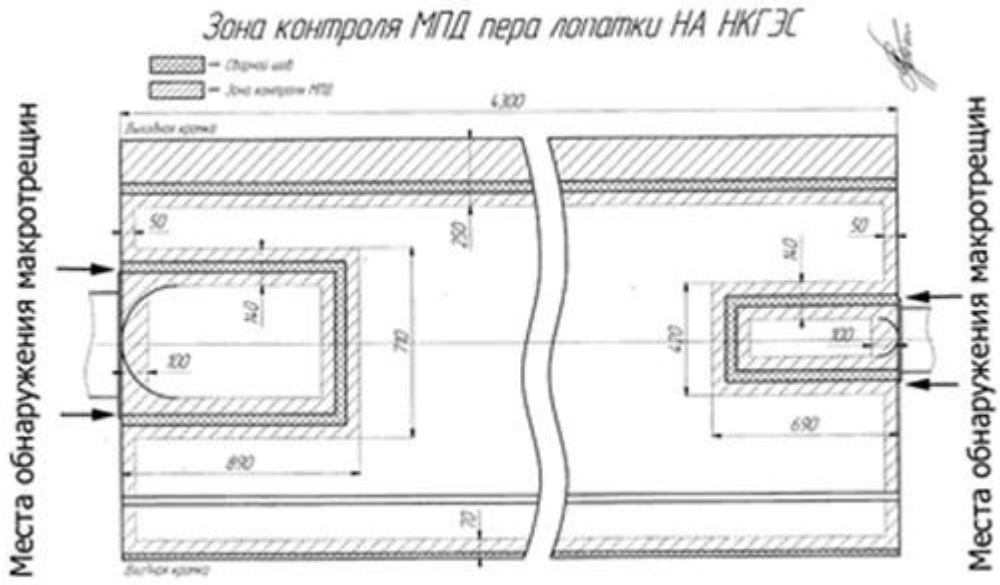


Рис. 3. Карта магнитопорошкового контроля.

После проведения дополнительных исследований методом магнитопорошковой дефектоскопии (МПД) в местах соединения верхней и нижней цапфы с пером лопатки на 82% лопаток обнаружены макродефекты в виде непроваров и пор, а также трещины, развившиеся от этих дефектов (рис.4-5). В качестве примера на рис. 7 показаны трещины, развившиеся от дефектов сварки. Трещины имеют значительный размер (до 40 мм). В ряде случаев, развиваясь от корня шва, они достигают поверхности изделия.

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.

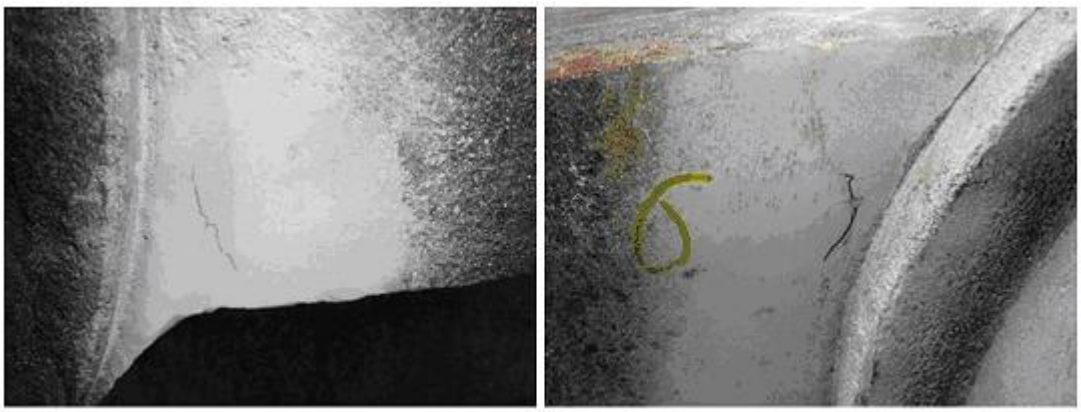


Рис. 4. Дефекты, обнаруженные МПД.

Обнаружено, что трещины чаще всего развиваются от дефектов в корне шва. Фотография, демонстрирующая распространение трещин от дефектов, приведена на рис. 5 (места распространения обозначены кружками).

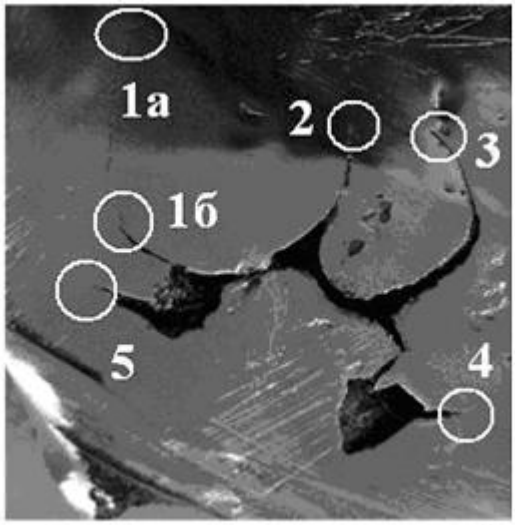
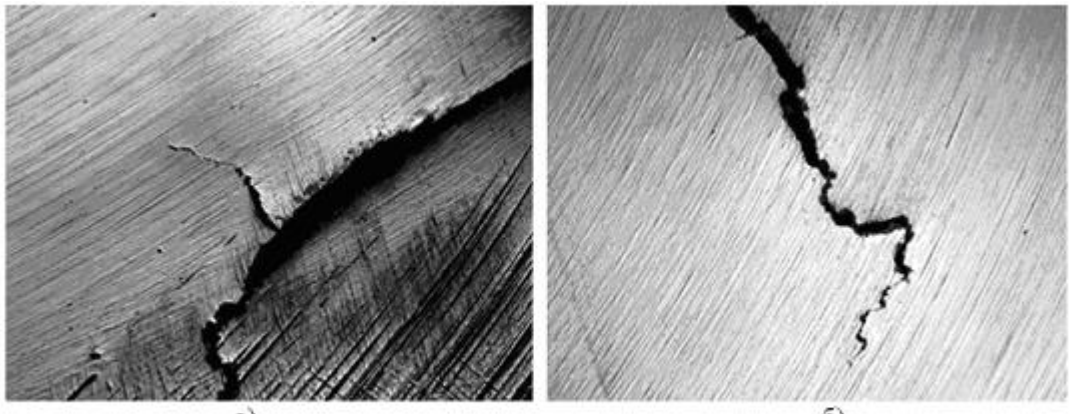


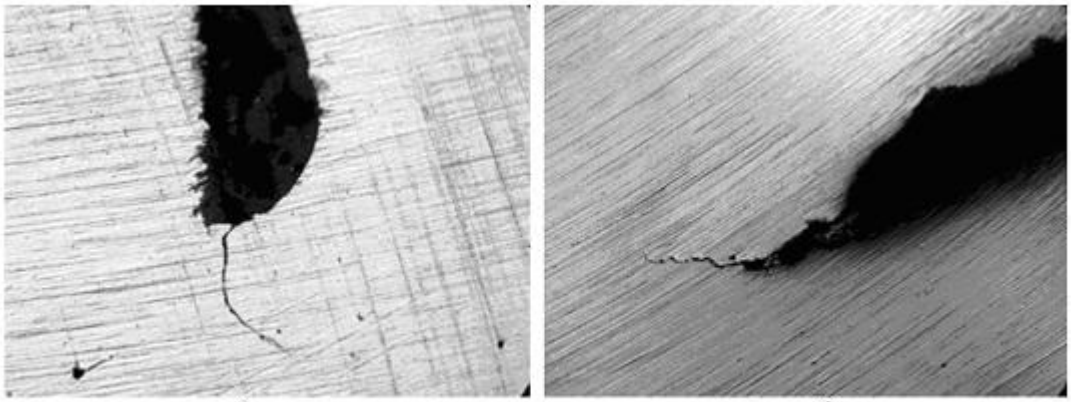
Рис. 5. Фотография поверхности с трещинами и дефектами сварки.

С помощью переносного мобильного оптического комплекса СПЕКТР МЕТ было сделано детальное изображение показанных на рис. 5 трещин (рис. 6 – 8), распространившихся от дефектов сварки.



а) б)

Рис. 6. Фотография трещины 1 (увеличение х75): а – зона №1а, б – зона №1б.



а) б)

Рис. 7. Фотография трещины 2: а – увеличение х75, б – увеличение х150.

На рис. 8 показана трещина, развившаяся от поры.

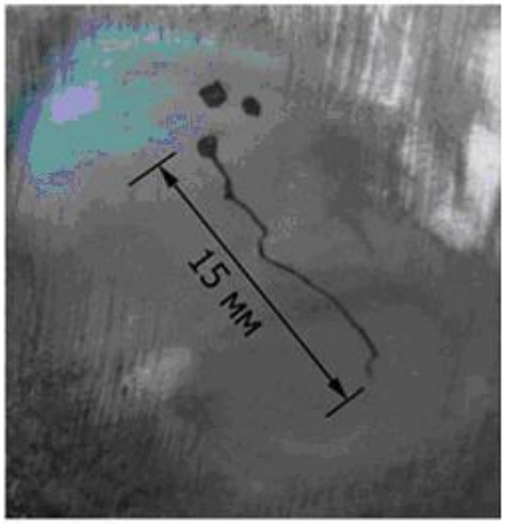


Рис. 8. Трещина, развившаяся от поры.

Вскрытие трещины 1 (рис. 5), берега которой изображены на рис. 9–10, показало, что развитие трещины происходило в условиях воздействия коррозионной среды.

Берега трещины имеют характерные участки. Участок *а* (рис. 9) – начало трещины от концентратора, которым являлся непровар в корне шва. Относительно гладкий участок *б* (рис. 9) 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 *в,* рис. 9), имеет грубый, волокнистый рельеф. Участок *в* мог сформироваться при достижении локальной концентрацией напряжений величины критического коэффициента интенсивности напряжения K_{1c} (плосконапряжённое состояние) или K_c (плоскодеформированное состояние), что вызвало нестабильный характер распространения трещины. Остановку трещины можно объяснить её выходом из области концентрации напряжений [2]. Участок *г* на рис. 9 соответствует долому при приготовлении образца.

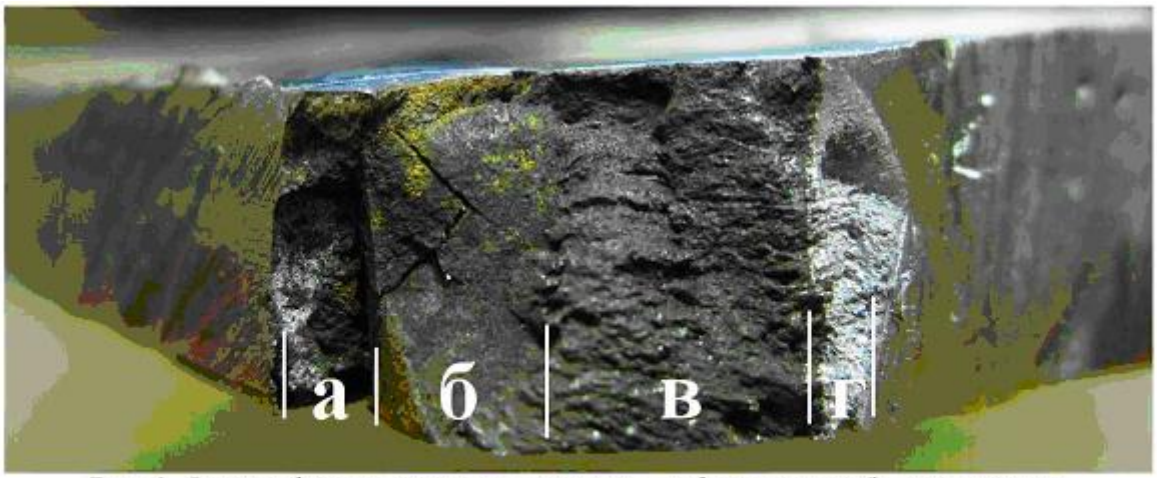


Рис. 9. Фотография поверхности излома: а – дефект сварки, б – поверхность соответствующая стабильному распространению усталостной трещины, в – участок нестабильного распространения трещины, г – участок долома при приготовлении образца.

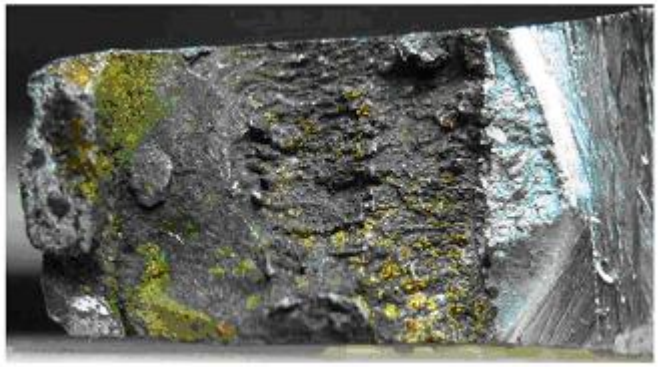


Рис. 10. Фотография поверхности излома (ответная часть).

На основе полученных данных была произведена консервативная оценка критической длины трещины для лопаток направляющего аппарата, выполненных из стали ВСт3сп3. Для расчета использовалось выражение [3]:

$$a = 2\frac{K_{1c}^2}{\pi\sigma^2}$$

где a – длина трещины, σ – механическое напряжение.

Величина K_{1c} для стали ВСт3сп3 составляет 125 МПа·м^{½} [4]. Для сталей 15 и 20, близких по химическому составу к стали ВСт3сп3, $K_{1c} \approx 80$ МПа·м^{½}.

Исходя из того, что механические напряжения могут достигать 200 МПа [5], критический размер трещины может находиться в диапазоне 100÷240 мм.

Учитывая характер обнаруженных дефектов, а также с целью апробации прибора, в цеховых условиях предприятия «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго» были выборочно (4 лопатки) проведены дополнительные исследования лопаток с помощью акустического томографа OmniScan MX-PA1664M. Секторное и линейное сканирование показало, что в местах сварки имеются множественные дефекты.

На рис. 11-12 в качестве примера представлены изображения дефектов, выполненных в режиме линейного (рис. 11) и секторного (рис. 12) сканирования сварных соединений пера лопатки и цапфы прибором OmniScan MX-PA1664M. Подробное описание прибора и

методика получения изображений дефектов приведена в [6]. Погрешность измерения размеров дефектов – около 2 мм.

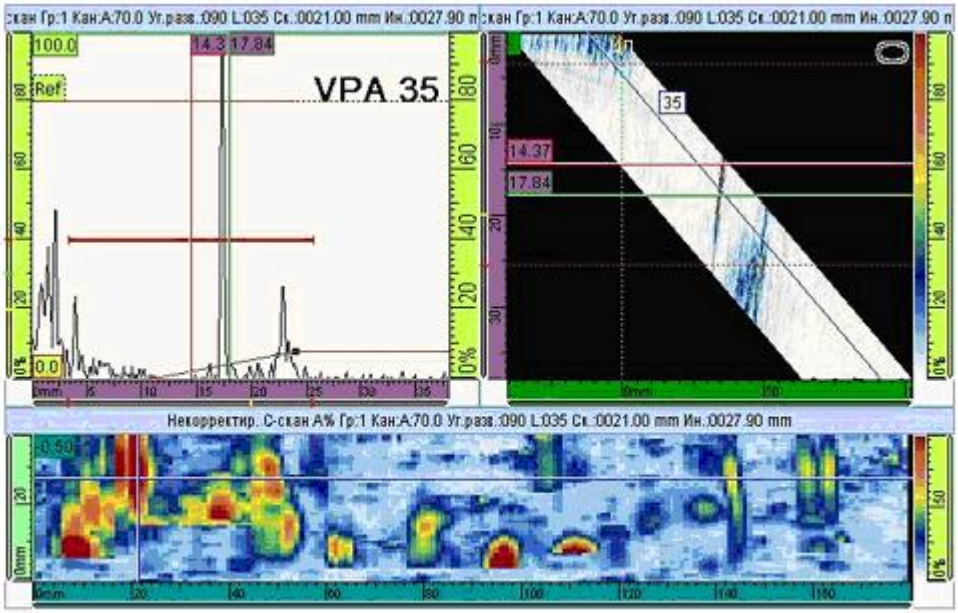


Рис. 11. Линейное сканирование.

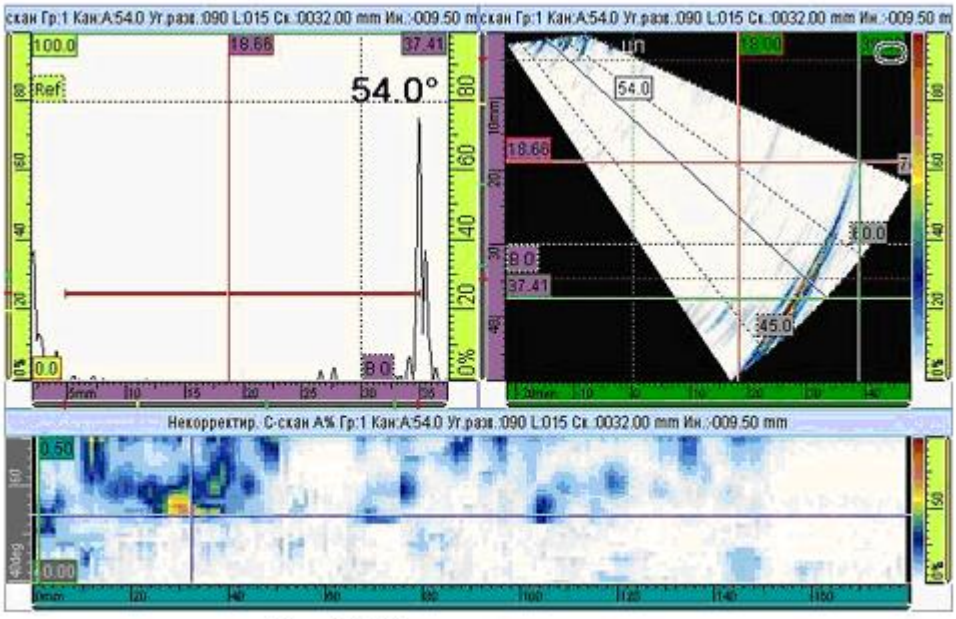


Рис. 12. Секторное сканирование.

Трещины, обнаруженные на торцевой поверхности изделия в области тройного соединения цапфы, заглушки и пера лопатки, имеют длину до 30 мм и распространяются от корня шва к поверхности на расстояние от 10 до 25 мм, в отдельных случаях достигают внешней поверхности недалеко от кромки пера. В сварных швах, соединяющих цапфу с пером лопатки, обнаружены дефекты размерами от 10 до 40 мм, при этом суммарная протяженность дефектов достигает 30 % от длины шва.

Согласно мероприятиям, которые осуществляет ДП АО «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго» согласно проекту: «Модернизация направляющего аппарата и нижнего подшипникового узла гидротурбины типа ПЛ 20/811 В-1000» №32841-02-09 для Нижнекамской ГЭС по восстановлению работоспособности лопаток, производится удаление

(выборка) материала с торцов пера лопатки, снятие облицовок средней и нижней цапфы, т.е. частичное удаление материала изделия в области тройного соединения цапфы, заглушки, пера лопатки и замена удаленного материала на нержавеющую сталь 08Х18Н10Т. Данное мероприятие приводит к уменьшению дефектов в зоне концентрации напряжений и усилению мест, в которых наблюдалось наибольшее разрушение.

Заключение

Выборочный контроль химического состава, структурного состояния и механических свойств материала лопаток показал, что материал лопаток соответствует марке В3Ст3сп. Механические свойства материала, за исключением предела текучести, соответствуют ГОСТу 380–71. Регламентированное ГОСТом значение предела текучести для стали В3Ст3сп составляет 235÷245 МПа. В местах сварного соединения верхней и нижней цапфы с пером обнаружены множественные дефекты сварки, а также трещины, распространившиеся в процессе эксплуатации от первоначальных дефектов сварки. Подобного рода дефекты охватывают 82% лопаток.

Методом ультразвуковой томографии определены размеры и глубина залегания дефектов. Трещины, обнаруженные на торцевой поверхности изделия в области тройного соединения цапфы, заглушки и пера лопатки, имеют длину до 30 мм и распространяются от корня шва к поверхности на расстояние от 10 до 25 мм. В сварных швах, соединяющих цапфу с пером лопатки, обнаружены дефекты размерами от 10 до 40 мм, при этом суммарная протяженность дефектов достигает 30 % от длины шва. Большая плотность дефектов сварки увеличивает вероятность их объединения при распространении трещин и полного разрушения изделия, особенно при повышении эксплуатационных нагрузок. Предварительный расчёт на основе механики разрушения показал, что критический размер трещины составляет 100 мм. Магнитопорошковый, капиллярный и визуальный контроль лопаток недостаточно эффективны, так как позволяют выявлять только те дефекты, которые уже вышли на поверхность. Однако большинство трещин пока не достигли размеров, обеспечивающих их выход на внешнюю поверхность лопаток. Магнитопорошковый контроль целесообразно дополнять акустическим контролем, позволяющим выявлять дефекты в объеме материала. Конструкция направляющего аппарата не позволяет контролировать состояние лопаток в течение длительного времени после запуска гидроагрегата. Всего были исследованы 28 лопаток, находящихся на восстановлении на территории предприятия «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго». Для определения фактического состояния лопаток необходимо получить более представительные статистические данные, которые можно собрать на нескольких турбинах этой и других аналогичных ГЭС.

Следует отметить, что мероприятия по реконструкции лопаток, проводимые предприятием «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго», позволяют убрать значительную часть дефектов сварного соединения пера, цапфы и заглушки в местах концентрации напряжений. Покрытие торцевой части лопаток нержавеющей сталью может значительно повысить надёжность и продлить ресурс лопаток.

Авторы выражают благодарность А.В. Гончару и К.В. Курашкину за выполнение измерений с помощью прибора OmniScan MX-PA1664M.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант №11-08-97070-р_поволжье_а).

Литература

1. Марочник сталей и сплавов/ В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
2. Херцберг Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов.– М.: Металлургия, 1989. – 576 с.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
4. Еремин К.И. Шаповалов Э.Л. Науменко В.Д. Влияние анизотропии проката на циклическую и статическую трещиностойкость сталей 09Г2С и ВСт3сп // Сварочное производство. – 1992. - № 12. – С. 2-3.
5. Лопатка направляющего аппарата. Расчет на прочность при гидроударе // Отчет ЗАО “СГТЗ”, 2011. – 13 с.
6. Понаморев С.Н. Контроль толстостенных сварных соединений из сталей перлитного класса ультразвуковым дефектоскопом с фазированной решеткой / С.Н. Понаморев, М.В. Гущин, А.А. Еремин, И.И. Михайлов, Ю.И. Дручинин // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 1. – С. 61–68.

Поступила: 05.10.11.