

ОБСЛЕДОВАНИЕ ТРУБЧАТЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КАРКАСА ВЫТЯЖНОЙ ТРУБЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

В. А. ТРОИЦКИЙ, М. В. БОРОДАВКО, В. П. ДЯДИН, Е. А. ДАВЫДОВ, М. Н. КАРМАНОВ*
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проанализированы результаты проведенного неразрушающего контроля новой вытяжной трубы Чернобыльской АЭС. Рассмотрены особенности, которые необходимо учитывать при анализе технической документации и последующем проведении неразрушающего контроля трубчатых профилей, из которых изготовлена данная конструкция. Выполнена систематизация обнаруженных дефектов и рассмотрен характер их развития в сварных соединениях элементов фасонных деталей башни трубы. Проведен детальный анализ возможных причин появления таких трещин. Рассмотрены основные недостатки, которые были допущены при проектировании данной конструкции. Отмечено, что требования нормативного документа ДБН В.1.2-2:2006 для оценки возможных ветровых воздействий, вызывающих аэродинамические знакопеременные колебания трубчатых элементов, были учтены не в полном объеме. Это привело к возникновению усталостных повреждений сварных соединений. Даны рекомендации к проведению неразрушающего контроля крупногабаритных трубчатых конструкций. Библиогр. 2, табл. 2, рис. 11.

Ключевые слова: трубчатый каркас, вентиляционная вытяжная труба, Чернобыльская АЭС, неразрушающий контроль, прорезная фасонка, дефекты сварных швов, колебания раскосов, ветровая нагрузка, узловые соединения

В настоящее время при сооружении крупногабаритных конструкций все больше находят применение трубчатые профили различного сечения, позволяющие значительно снизить их металлоемкость. Из таких профилей строятся сейчас стадионы, мосты и другие сооружения. Вместе с тем как при дефектоскопии, так и при прочностных расчетах данных профилей необходимо учитывать их особенности [1]. Рассмотрим эти особенности на примере обследования уникального, общеевропейского значения объекта – башни новой вентиляционной трубы Чернобыльской АЭС. Башня изготовлена из трубчатых и мостовых элементов разного профиля. На рис. 1 показан общий вид и характер-

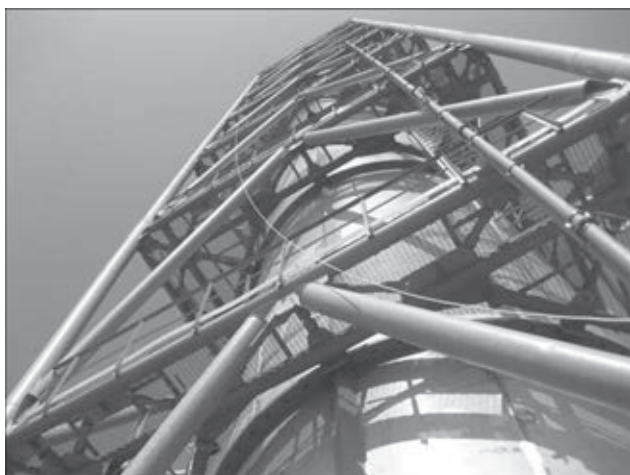


Рис. 1. Общий вид и характерные узлы каркаса вытяжной трубы

ные узлы этого уникального сооружения. Вентиляционная труба диаметром 6 м «одета» в поддерживающий каркас из деталей трубчатого профиля.

Данная вентиляционная труба заменила старую и обеспечивает вытяжку воздуха из третьего и четвертого (разрушенного) блоков ЧАЭС. Новая вентиляционная труба (НВТ) была введена в эксплуатацию в декабре 2011 г. С начала эксплуатации по июнь 2012 г. зрителями были обнаружены дефекты в сварных соединениях на элементах фасонных деталей башни трубы. Эксплуатационниками было выявлено всего 14 дефектов в узлах, соединяющих опорную стойку $\varnothing 325 \times 8$ мм и прорезную фасонку толщиной 12 мм на отметках +100; +107 и +114. Обнаруженные дефекты располагались в верхней части прорезных фасонки на границе перехода от сварного соединения к основному металлу фасонки с двух сторон. Зарождение дефектов и их развитие начиналось по верхнему краю фасонки от границы перехода с кольцевым швом, соединяющим прорезную фасонку с опорной стойкой. Типичные трещины приведены на рис. 2. Анализ возможных причин появления таких трещин показал, что при проектировании данной конструкции неудачно избыточно введен монтажный кольцевой шов трубы диаметром 325×8 мм по краю прорезной фасонки, который привел к повышенной концентрации напряжений. Как следствие, данный узел характеризуется крайне низким сопротивлением усталости; склонностью к появлению дефектов, создающих

*В работах принимал участие А. Е. Литвиненко



Рис. 2. Узел примыкания раскосов к опорной стойке Ø 325×8 мм в узле 36-Ж на отметке 114,92 м с обнаруженным ранее дефектом (показано стрелкой)

дополнительные очаги для зарождения усталостных трещин. Этот недостаток проявился при циклических нагрузках, в данном случае вызываемых аэродинамическими эффектами.

Следует отметить, что, к сожалению, согласно нормативному документу ДБН В.1.2-2:2006 ветровые воздействия, вызывающие аэродинамические знакопеременные колебания, следует учитывать необязательно, только в необходимых случаях. При этом критерий и требования необходимости такого учета не приведены, хотя именно они имеют первостепенное значение для образования трещин.

Если предположить, что в прилегающих раскосах могут возникать аэродинамические знакопеременные колебания, то можно утверждать о большой вероятности быстрого возникновения и развития дефектов в этих узлах. Это, в свою очередь, значительно нивелирует преимущества применения трубчатых элементов в подобных конструкциях и требует специальных мер по определению появления трещин.

Перед началом дефектоскопических исследований был проведен анализ исполнительной документации монтажной организации. Он не выявил существенных отклонений от нормативных требований, которые могли бы привести к появлению и росту дефектов за такой короткий период времени эксплуатации. Сборка трубчатых элементов с прорезными фасонками проводилась в цеховых условиях, тем не менее, все обнаруженные трещины сконцентрированы в прорезных фасонках толщиной 12 мм, расположенных на отметках +100; +107 и +114. Этот факт косвенно опровергает предположение о причине появления трещин как водородного растрескивания, так как иначе следовало бы ожидать появления трещин во всех прорезных фасонках. Физико-химический анализ разломов также не подтвердил версию водородного растрескивания.

Сборка секций и раскосов выполнялась на промышленной площадке ЧАЭС, при этом отсут-

ствуют документальные свидетельства о том, что нагрузки при сборке и монтаже металлоконструкций во время проведения строительных работ превышали расчетные ограничения. Таким образом, исходя из анализа расположения обнаруженных дефектов ясно, что в основном трещины возникают по совокупности как конструктивных недоработок, так и возможных попутных допущенных технологических нарушений при изготовлении и монтаже узлов трубчатых соединений.

Для мониторинга состояния каркаса башни, исходя из предварительного анализа представленных данных, были поставлены следующие задачи выявления вероятных причин возникновения в трубчатой конструкции дефектов:

- влияние конструктивных решений, принятых при проектировании узла примыкания прорезной фасонки к опорной стойке и раскосу на появление и развитие трещин;
- количественная оценка дефектов, построение картины расположения зон с трещинами;
- уточнение характерных зон повреждений элементов каркаса и их взаимосвязь с различного рода нагрузками, включая учет местной розы ветров и т. п.

При проведении выборочного НК сварных соединений металлоконструкций были применены УЗД, капиллярный и магнитный методы. Для этого было отобрано 52 участка, расположенных в сварных соединениях опорной стойки Ø 325×8 мм и прорезными фасонками толщиной 12 и 14 мм на отметках +78,92; +86,12; +93,32; +100,52; +107,72 и +114,92. Отобранные места включали все обнаруженные ранее дефекты (рис. 2); обозначения узлов представлены на рис. 3. Обследованию подвергались все элементы обвязки каркаса трубы.

В процессе визуального обследования всего трубчатого каркаса башни НВТ было выявлено, что обнаруженные трещины носят системный характер [2]. Они расположены на отметках +100,52; +107,72; +114,92 и +122 м и находятся как в узлах соединения элементов раскоса с опорными

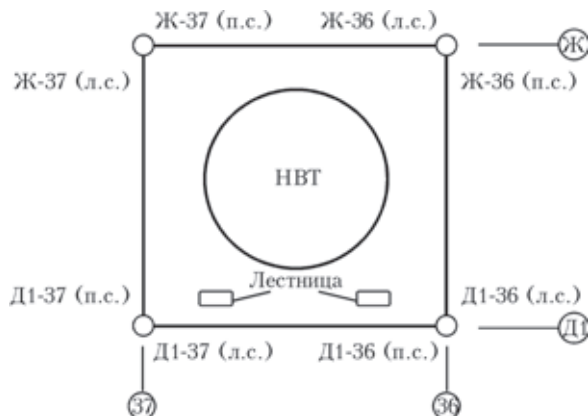


Рис. 3. Разработанная схема обозначения узлов для каждой отметки (п.с., л.с.– правая и левая сторона узла соответственно)

стойками башни (рис. 2, 4), так и в узлах соединения раскосов с распоркой в средней ее части под площадками, расположенными на данных отметках (рис. 5). Важно отметить, что при первичном осмотре повреждения были выявлены только в узлах крепления элементов решетки (раскосов и распорок) к трубчатым стойкам. Характерной особенностью выявленных дефектов в узлах соединения элементов раскоса с опорными стойками башни являлось то, что они находились в верхней части фасонки на границе перехода от углового сварного соединения к основному металлу фасонки и наблюдались с двух ее сторон. Из 17 трещин в узлах соединения элементов раскоса с опорными трубчатыми стойками только часть имела сквозной характер, развившихся от верхнего края прорезной фасонки. Такой рост трещин мог быть вызван изгибом, действующим из плоскости фасонки. Рост глубины трещин такого рода продолжится только в том случае, если будут превышены прежние нагрузки.

Данное предположение достаточно хорошо согласуется с тем фактом, что дополнительно выявленные трещины в узлах соединения раскосов с распоркой (рис. 5) как раз попадают под действие такого изгиба. Узел характерен тем, что врезная фасонка раскоса с одной стороны подкреплена ребром жесткости, которое приварено к фасонке и заглушке. Такое соединение является неудачным и является наиболее уязвимым к появлению и разви-

тию трещин при действии изгибающих усилий из-за наличия резкого перепада жесткостей (рис. 5). Значительная разница в размерах трещин может означать, что они образовались в разное время, находятся в зонах разных нагрузок и все они развиваются как трещины усталости. Отсутствие видимого раскрытия берегов трещины, несмотря на их протяженность, дополнительно свидетельствует об усталостном характере их происхождения.

Так, при обследовании узлов, соединяющих опорную трубную стойку $\varnothing 325 \times 8$ мм и прорезную фасонку толщиной 12 мм на отметке +100, 52,



Рис. 4. Характерное повреждение по границе перехода от шва к основному металлу прорезной фасонки



Рис. 5. Характерное повреждение в узле соединения раскосов с распоркой под площадкой (показаны стрелками)



Рис. 6. Трещина в заглушке в зоне ребра левого (а) и правого (б) раскоса длиной около 150 мм по линии (37-Д1)-(37-Ж) ниже отметки +107,72 и общий вид расположения раскосов под площадкой ниже отметки +107,72 в зоне крепления к горизонтальной связи по линии (37-Д1)-(37-Ж) (в)



было выявлено шесть трещин, развивающихся по околошовной зоне угловых швов со стороны прорезных фасонки, протяженностью от 50 до 150 мм. Характерно, что в узле расколов под площадкой был выявлен только один дефект в ребре протяженностью около 25 мм на высоте, где помимо уменьшения толщины фасонки уменьшается и диаметр труб, используемых для вертикальных связей и расколов.

Визуальный осмотр на уровне площадки +107,72 (рис. 6 – 8) показал, что узлы соединения расколов под площадкой претерпели значительные повреждения за истекший период после монтажа. Основные повреждения расколов носят систематический характер и находятся в зоне приварки заглушки и ребра жесткости к ней.

Всего на данной отметке было обнаружено 9 трещин. Трещины также носят систематический характер развития и находятся в узлах крепления расколов к горизонтальной связи под площадкой (4) и соединениях с опорной стойкой (5 трещин).

Обследование узлов, соединяющих опорную трубчатую стойку Ø 325×8 мм и прорезную фасонку толщиной 12 мм на отметке +114,92 также

показало наличие трещин, развивающихся по околошовной зоне угловых швов со стороны прорезных фасонки и повреждения расколов в местах их крепления к горизонтальным связям под площадкой.

Всего на данной отметке было обнаружено 14 трещин: узел крепления расколов к горизонтальной связи под площадкой (6) и узел соединения опорных стоек в местах контакта с прорезной фасонкой (7+1).

Кроме того, по нашей просьбе заказчик предоставил фрагмент ранее вырезанного участка для визуального осмотра. Имеющийся на поверхности вырезанного фрагмента излом представлен на рис. 9. На рисунке хорошо видно, что поверхность излома носит ступенчатый характер. Шевронный узор на поверхности излома дополнительно свидетельствует об усталостном характере развития трещины с внешней стороны фасонки по околошовной зоне углового шва. Причем ступенчатый характер развития трещины имеет место с обеих сторон фасонки, что свидетельствует о знакопеременной нагрузке.

Стоит выделить результаты осмотра узлов на отметке +122,12, где были выявлены только повреждения расколов в местах их крепления к го-

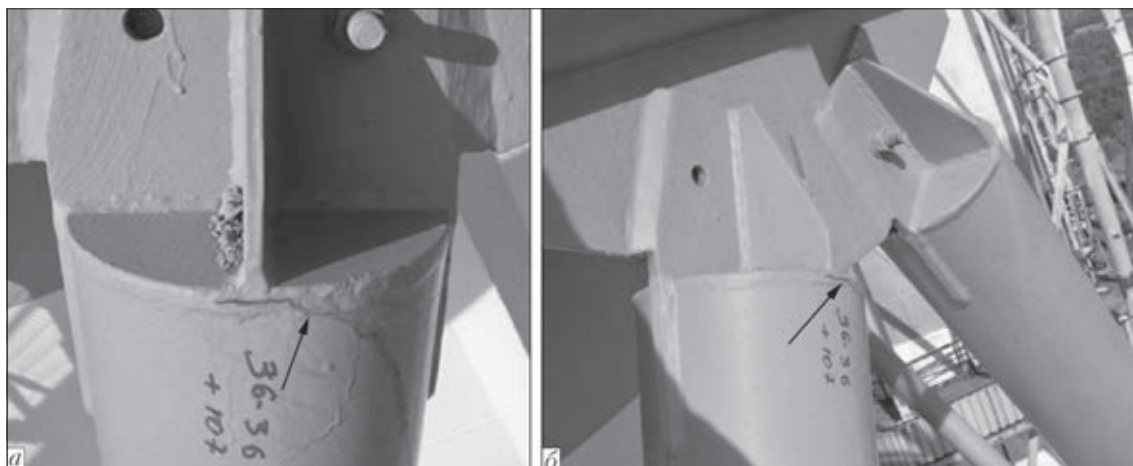


Рис. 7. Трещина в заглушке под ребром левого раскола длиной около 60 мм по линии (36-Д1) – (36-Ж) ниже отметки +107,72 (а) и общий вид расположения расколов под площадкой с отметкой +107,72 в зоне крепления к горизонтальной связи по линии (36-Д1) – (36-Ж) (б)

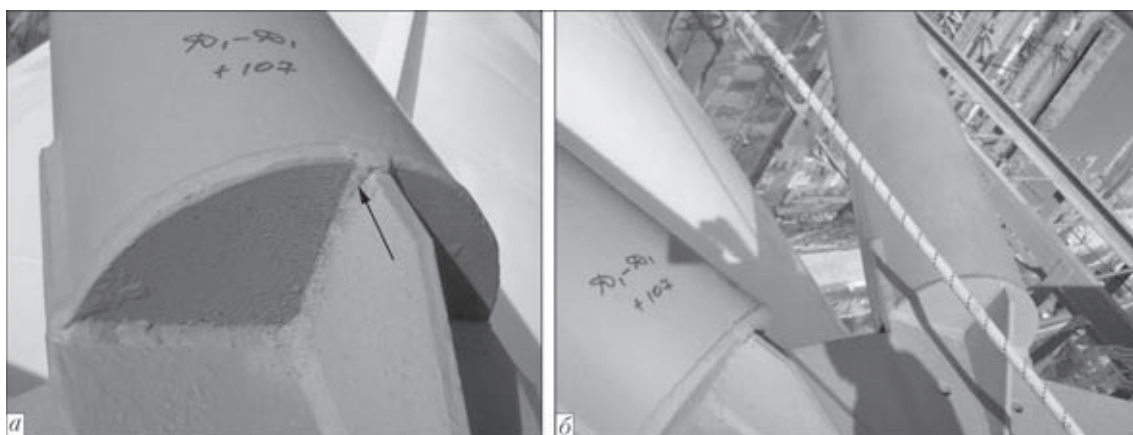


Рис. 8. Трещина в ребре левого раскола длиной около 25 мм по линии (36-Д1) – (37-Д1) ниже отметки +107,72 (а) и общий вид расположения расколов под площадкой с отметкой +107,72 в зоне крепления к горизонтальной связи по линии (36-Д1) – (37-Д1) (б)

ризонтальным связям под площадкой. Всего на данной отметке было обнаружено 6 трещин.

В табл. 1. представлены сводные данные обнаруженных дефектов в раскосах, расположенных ниже отметок +107; +114 и +122.

Результаты ультразвукового контроля основных элементов каркаса систематизированы в табл. 2 (обозначение узлов показано на рис. 3).

Кроме зон, отмеченных в табл. 2, был выполнен также УЗ-контроль основного металла прорезных фасонок. Контролю подвергались участки, примыкающие к сварному соединению фасонки со стороны опорной стойки, на участках шириной примерно 50...60 мм, а также участки под сварным соединением приварки раскоса к фасонке. Целью проведения данного обследования являлось выявление потенциальных мест расслоения основного металла из-за сварочных напряжений в направлении толщины фасонки (Z-направление).

В результате проведенного контроля основного металла фасонки на отобранных контрольных участках расслоения не выявлены, что свидетельствует о том, что металл для изготовления каркаса НВТ был достаточно хорошего качества.

На рис. 10 представлен общий вид расположения обнаруженных трещин. Места повреждений

выделены красным цветом. Как видно из данного рисунка, дефекты в конструкции распределяются достаточно равномерно, включая отметку 122 м.

Для выявления роли розы ветров в зоне сооружения, т. е. распределения дефектов в узловых со-

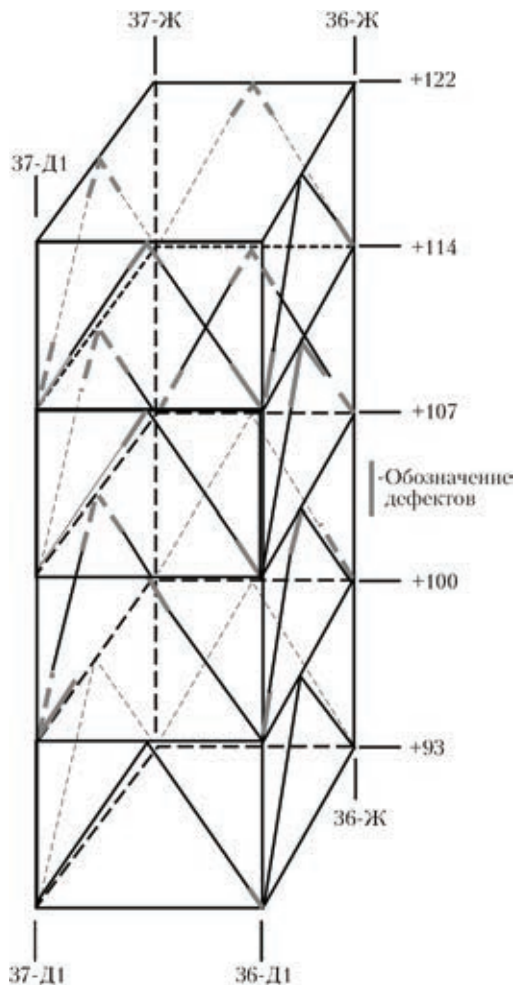


Рис. 10. Общий вид верхней части каркаса трубчатой конструкции НВТ и мест расположения трещин на верхних элементах каркаса

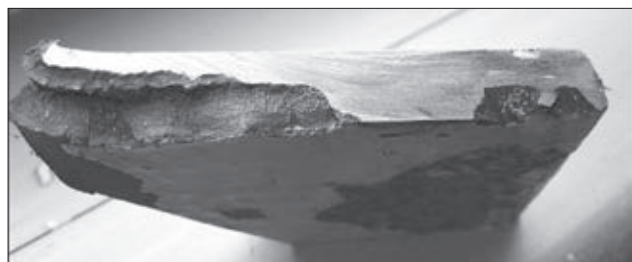


Рис. 9. Поверхности излома фрагмента левой фасонки узла 36-Ж на отметке 114,92

Таблица 1. Выявленные дефекты в узлах соединения раскосов под площадками по результатам визуального контроля

Номер п/п	Обозначение площадки	Обозначение узла	Выявленный размер трещин, мм
1	Узлы соединения раскосов под площадкой +122 м	Ж37-Д1-37 правый (запад)	Трещина в заглушке под ребром 50 мм, в ребре 5 мм
2		Ж37-Д1-37 левый (запад)	Трещина в ребре 80 мм
3		Ж37-Ж36 правый (север)	Трещина в заглушке 180 мм
4		Ж37-Ж36 левый (север)	Трещина в ребре 35 мм
5		Д1 37-Д1 36 правый (юг)	Подрыв ребра жесткости 50 мм
6		Д1 37-Д1 36 левый (юг)	Подрыв ребра жесткости 25 мм
7	Узлы соединения раскосов под площадкой +114 м	Ж36-Д1 36 правый (восток)	Трещина в заглушке в зоне приварки ребра 80 мм
8		Ж36-Д1 36 правый (восток)	Трещина в ребре 5 мм
9		Ж37-Д1-37 правый (запад)	Подрыв заглушки в зоне ребра 100 мм
10		Ж37-Д1-37 левый (запад)	Трещина в ребре 10 мм
11		Ж37-Ж36 правый (север)	Трещина в ребре 30 мм и подрыв заглушки 100 мм
12		Ж37-Ж36 левый (север)	Трещина в ребре 30 мм
13	Узлы соединения раскосов под площадкой +107 м	Д1 37-Д1 36 правый (юг)	В правом раскосе подорвано ребро жесткости 35 мм; в левом 5 мм
14		Ж36-Д1 36 левый (восток)	Подрыв заглушки 60 мм. В ребре нет выкружки
15		Ж37-Д1-37 правый (запад)	Трещина в заглушке 150 мм
16		Ж37-Д1-37 левый (запад)	Трещина в заглушке 150 мм
17		Д1 37-Д1 36 левый (юг)	Трещина в заглушке 25 мм



Таблица 2. Результаты УЗК сварных соединений фасонка–труба

Номер п/п	Обозначение отметки	Обозначение узла (см. рис. 3)	Выявленная длина L несплошности, мм	Примечания
1	+78,92	Ж-36 (л.с.)	20	Поверхностный подрез. Начинается с 60 мм, протяженность 20 мм
2	+93,32	Д1-36 (п.с.)	Не выявлено	
3	+100,52	Д1-37 (п.с.)	50	От начала фасонки
4		Д1-37 (л.с.)	50	От начала фасонки. Визуально ранее не выявлена
5		Ж-37 (п.с.)	Не выявлено	
6		Ж-37 (л.с.)	60	От начала фасонки
7		Ж-36 (п.с.)	50	->-
8		Ж-36 (л.с.)	50	->-
9		Д1-36 (п.с.)	Не выявлено	
10		Д1-36 (л.с.)	120	От начала фасонки
11	+107,72	Д1-37 (п.с.)	Не выявлено	
12		Д1-37 (л.с.)	->-	Возможно несплавление по кромке около 30 мм (от начала фасонки)
13		Ж-37 (п.с.)	->-	
14		Ж-37 (л.с.)	80	От начала фасонки
15		Ж-36 (п.с.)	50	->-
16		Ж-36 (л.с.)	Не выявлено	
17		Д1-36 (п.с.)	40	От начала фасонки
18		Д1-36 (л.с.)	Не выявлено	
19	+114,92	Д1-37 (п.с.)	30	От начала фасонки
20		Д1-37 (л.с.)	60	->-
21		Ж-37 (п.с.)	40	От начала фасонки. Визуально ранее не выявлена
22		Ж-37 (л.с.)	Не выявлено	
23		Ж-36 (п.с.)	40	От начала фасонки. Визуально ранее не выявлена
24		Ж-36 (л.с.)	-	Удалена часть фасонки
25		Д1-36 (п.с.)	100	От начала фасонки
26		Д1-36 (л.с.)	100	->-

Примечание: л.с. – левая сторона узла, п.с. – правая сторона

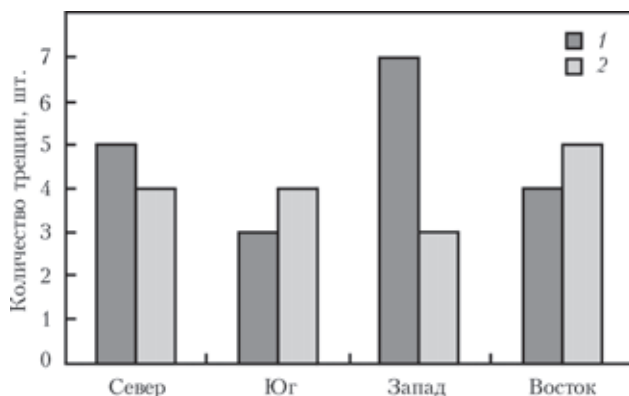


Рис. 11. Распределение выявленных трещин в зависимости от сторон света: 1 – трещины в прорезных фасонках; 2 – трещины в раскосах над площадками (трубными загрузками)

единениях каркаса НВТ и направления ветровых нагрузок, на рис. 11 дана гистограмма ветров по их направлениям.

Как видно из рис. 11, минимальное значение обнаруженных дефектов наблюдается при ветрах южного направления, а наибольшее – при западном направлении ветров и соответствует розе ветров в месте сооружения, что рекомендовано учесть при выполнении ремонтных работ и реконструкции каркаса.

Выводы

Трубная металлоконструкция каркаса новой вытяжной трубы Чернобыльской АЭС была подвергнута с помощью средств неразрушающего контроля тщательному обследованию и было обнаружено много опасных трещин.

Геометрические размеры узлов 36-Д1, 36-Ж, 37-Д1 и 37-Ж на всех отметках каркаса НВТ соответствуют представленной проектной и исполнительной документации, минимальные толщины угловых швов соответствуют требованиям таблицы 38 СНиП II-23-81. В целом конструкция изготовлена и смонтирована в соответствии с требованиями проекта.

Выявленные дефекты расположены преимущественно на отметках +100; +107; +114 и 122 и носят систематический характер, т. е. являются недостатками проектирования.

Все трещины в раскосах наблюдаются только в трубчатых элементах $\varnothing 180 \times 6$. На больших диаметрах и толщинах трещин не наблюдается, что должно быть учтено при сооружении подобных трубчатых конструкций.

Все трещины в прорезных фасонках наблюдаются при их переходе на толщину 12 мм и в зонах сварных соединений стыковки вертикальных

трубчатых стоек, т.е. зоны повышенной концентрации остаточных напряжений.

Анализ поверхности излома на левой фасонке узла 36-Ж (отметка +114,92) свидетельствует об усталостном характере развития двухстороннего излома со стороны прорезной плоской фасонки по околошовной зоне ее приварки к трубчатой опорной стойке.

Трещины в раскосах расположены в околошовных зонах приварки заглушек к трубе в местах пересечения с вертикальным ребром жесткости и носят усталостный характер развития, чего так же могло бы не быть при правильном проектировании.

Наибольшая поврежденность верхних элементов башни НВТ наблюдается со стороны запад-

ного направления ветра, т.е. при сооружении подобных объектов должна учитываться роза ветров местности на разных высотах.

Результаты проведенных дефектоскопических исследований и выполненный анализ происхождения трещин должны быть учтены при реконструкции данного ответственного сооружения.

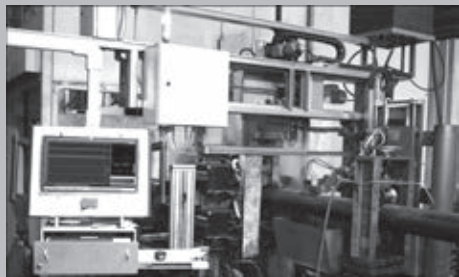
1. *Определение* причин возникновения трещин в конструктивных элементах башни новой вентиляционной трубы на Чернобыльской АЭС / В. М. Тороп., Э. Ф. Гарф., А. В. Якимкин., Е. Е. Гопкало // Автомат. сварка – 2014. – № 1. – С. 5–16.
2. *Результаты* обследования сварных соединений каркаса новой вентиляционной трубы на объекте «Чернобыльская АЭС»: отчет Опыт. конструктор.-технолог. бюро ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. – Киев, 2012. – 83 с.

Results of the performed nondestructive testing of the new exhaust pipe of Chernobyl NPP have been analyzed. Features are considered, which should be taken into account at analysis of technical documentation and subsequent performance of NDT of tubular sections, from which this structure is made. Systematizing of the detected defects was performed and nature of their development in welded joints of shaped elements of pipe tower was considered. Detailed analysis of the possible causes for appearance of such cracks was performed. Main drawbacks of this structure design are considered. It is noted that requirements of normative document DBN V.1.2-2:2006 to assess the possible wind impacts causing aerodynamic alternating vibrations in tubular elements, have not been fully taken into account. 2 References, 2 Tables, 11 Figures.

Keywords: tubular frame, ventilation pipe, Chernobyl NPP, non-destructive testing, slotted gusset, weld defects, brace vibrations, wind load, nodal connections

Поступила в редакцию
01.04.2014

ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ ПРЯМОШОВНЫХ ТРУБ



На базе Украинского научно-исследовательского института неразрушающего контроля (УкрНИИ НК) была разработана комплексная система неразрушающего ультразвукового контроля сварного шва «ПШ-11».

Система состоит из модуля ультразвукового контроля наличия продольно-ориентированных дефектов в линии сплавления и околошовной зоне и модуля «профилометрии», при помощи которого обеспечивается измерение толщины стенки основного металла трубы, высоты остаточного наружного и внутреннего

грата, а также оценка конфигурации зоны сварного шва и прилегающих зон тела трубы. Система эксплуатируется в тяжелых производственных условиях: высокие температуры – до 250 °С в зоне контроля, наличие большого количества окалины и высокая скорость контроля – до 1 м/с.

Опыт эксплуатации показал высокую эффективность оборудования в части выявления дефектов металла в прикромочной зоне листа, подлежащей сварке, онлайн мониторинга процесса механической обработки наружного и внутреннего гратов сварного шва.

Система технологического УЗК сварного шва «ПШ-11» благодаря мощному аппаратно-вычислительному комплексу «Унискан-ЛуЧ» и использованию новейших технологий в части автоматизации позволяют сохранять полный пакет информации о проведенном контроле: регистрация и учет пользователей системы с различными уровнями доступа, регистрация и сохранение базы данных настроек на различные типоразмеры и марки стали труб, базы проконтролированных труб с возможностью просмотра диаграмм по каждой трубе отдельно и формированием суммарных отчетов и протоколов. Система позволяет производить краскоотметку дефектных сечений на трубе с точностью не хуже 30 мм.