



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ БАШНИ НОВОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ТРУБЫ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

В. М. ТОРОП¹, Э. Ф. ГАРФ¹, А. В. ЯКИМКИН¹, Е. Е. ГОПКАЛО²

¹ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

² Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ. 01014, г. Киев-14, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: office@ipp.kiev.ua

Выполнен анализ проектной и эксплуатационной документации, а также соответствие фактических нагрузок и режимов эксплуатации новой вентиляционной трубы требованиям данной документации. Проанализированы результаты неразрушающего контроля основного металла и сварных соединений конструктивных элементов новой вентиляционной трубы на ЧАЭС. Трещины в узлах башни новой вентиляционной трубы ЧАЭС носят системный характер. Они образовались в зонах сварных узловых соединений трех верхних ярусов башни, в которых элементы решетки выполнены из труб сечением 193,7×6 мм. В настоящий момент трещины выявлены в 17 узлах прорезной фасонки стойки и в 17 узлах крепления раскосов к распорке. Отобраны темплеты, представляющие собой трещиносодержащие фрагменты фасонки — конструктивных элементов новой вентиляционной трубы ЧАЭС, изготовлены образцы и проведены экспериментальные исследования химического состава, микротвердости, механических свойств и структуры основного металла, металла зоны термического влияния и металла шва. Определены причины и механизмы возникновения трещин в конструктивных элементах новой вентиляционной трубы при проведении материаловедческих исследований на двух вырезанных темплатах. Фрактографические исследования выявили усталостный характер возникновения и развития поверхностных трещин в фасонках. Аэродинамические и прочностные расчеты сооружения и отдельных его элементов убедительно показали, что причиной возникновения трещин являются резонансные колебания раскосов в верхних трех секциях башни, направленные из плоскости граней и вызывающие переменные изгибные напряжения в узлах. Определены частоты колебаний и усилия, передаваемые на узлы. Поля напряжений, вызванные периодическими усилиями в раскосах, подтверждают зону образования и развития разрушения, а максимальные уровни напряжений значительно превосходят пределы усталости сварных соединений. Сделан вывод о том, что в проекте башни использованы устаревшие конструктивные решения узлов, характеризующиеся многочисленными зонами высокой концентрации напряжений, низким сопротивлением усталости и низкой сопротивляемостью коррозионным воздействиям. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 20.

Ключевые слова: сварные соединения, сварные узлы, усталость, резонанс, долговечность, фрактография, металлографические исследования, усталостная трещина, расчет на прочность, новая вентиляционная труба, Чернобыльская АЭС

В ходе анализа проектной документации установлено, что возведение новой вентиляционной трубы (НВТ) выполнено над помещением 7001 блока В главного корпуса второй очереди Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) между осями Д1-Ж/36-37. Главный корпус второй очереди ЧАЭС представляет собой сложное сооружение, включающее 3-й энергоблок, разрушенный 4-й энергоблок (объект «Укрытие») и общий для обоих энергоблоков блок В. На отметке 74,500 м блока В между осями И-Н/36-40 расположена существующая вентиляционная труба ВТ-2.

Новая вентиляционная труба (НВТ) представляет собой башню в виде несущего стального каркаса с расположенным в нем газоотводящим стволом, диаметр которого составляет 6,0 м. Несущий каркас башни НВТ — четырехгранная пространственная решетчатая конструкция с размера-

ми в плане 8,05×8,05 м (в осях) и высотой 50,0 м. Внутри башни с шагом 7,2 м предусмотрены горизонтальные диафрагмы, совмещенные с переходными площадками. Для доступа на площадки предусмотрены вертикальные лестницы-стремянки. Башня НВТ опирается на металлический опорный контур на отметке 71,650 м. Стойки башни, основные связи и решетки между стойками выполнены из цилиндрических электросварных труб.

Газоотводящий ствол диаметром 6,0 м с четырьмя вертикальными ребрами жесткости опирается на металлический контур на отметке 71,650 м. Отметка верха газоотводящего ствола 125,000 м. Через каждые 7,2 м по высоте газоотводящий ствол закрепляется в горизонтальном направлении к диафрагмам башни. Стыки газоотводящего ствола выполняются фланцевыми соединениями на бол-



тах. Для связи газоотводящего ствола с помещением 7001 блока В предусматривается демонтаж керамзитобетонных плит покрытия на отметке 71,000 м в осях Д1-Ж/36-37.

Металлический опорный контур представляет собой систему балок, раскрепленных горизонтальными связями. На две главные балки опорного контура, располагаемые по осям Д1 и Ж, крепятся стойки башни НВТ. Главные балки опорного контура крепятся к существующим железобетонным конструкциям блока В в четырех местах на отметке 70,700 м по осям Д1-Ж/36-37. Опорные узлы крепления главных балок рассчитаны на восприятие вертикальных (в том числе и отрывающих) и горизонтальных нагрузок от НВТ.

Раскосы нижних ярусов башни НВТ – трубы диаметром 245 мм с толщиной стенки 8 мм для раскосов ВС1. Для раскосов ВС2 принята труба 219×6 мм. Раскосы ВС3, установленные на отметке 100,36...121,96 м, выполнены из трубы 193,7×6 мм. Гибкость раскосов λ ВС3 составляет 170. Гибкость раскосов ВС1 и ВС2 составляет 130 и 150 соответственно, при этом негативное влияние колебаний для этих элементов менее заметно. Следует также учитывать, что фасонки на нижних ярусах выполнены из листового проката большей толщины, чем фасонки в узлах крепления раскосов ВС3, толщина которых составляет 12 мм. Согласно данным, приведенным в [1], потенциально опасной областью возникновения автоколебаний круглых стальных стержней решетчатых конструкций являются элементы с λ от 100 до 350.

Проведенное специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины обследование узловых соединений башни НВТ и выявленные при этом трещиноподобные дефекты [2], материаловедческие исследования металла в зоне образования трещин и детальный анализ поверхности излома [3], позволяют взвешено и аргументировано подойти к установлению причины образования трещин в узлах НВТ.

В ходе обследования металлических конструкций несущего каркаса НВТ в уровне верхних ярусов каркаса башни на отметках 114,92, 107,72, 100,52 м [2] выявлены следующие недостатки:

- ♦ отсутствие монтажных болтов вследствие расцентровки отверстий в соединительных фасонках (вызвано нарушениями геометрической точности при сборке каркаса);

- ♦ наличие трещин в верхней части вертикальных фасонок стоек в местах примыкания раскосов.

Обращает на себя внимание тот факт, что расположение выявленных трещин носит системный характер. Все трещины обнаружены в трех верхних секциях башни. Общим для этих секций является

то, что элементы решетки выполнены из цилиндрических труб сечением 193,7×6 мм, а фасонки имеют толщину стенки 12 мм. В этих секциях из 24 узлов примыкания решетки к прорезной фасонке стойки башни в 17 выявлены трещины, а из 24 узлов соединения раскоса с распоркой обнаружены в 17 (рис. 1). Следует отметить, что специалисты проводили обследование в условиях высокого радиационного фона, и были ограничены во времени. Поэтому велика вероятность того, что не все трещины выявлены.

Трещины имеют разную протяженность. Они зарождаются от края в верхней части узловой фасонки (узел примыкания элементов решетки к стойке башни) и развиваются вниз вдоль фасонки и в глубину (рис. 1, а). В узле сопряжения раскосов с распоркой трещины имеют место в соединении ребра с трубой раскоса через тонкую заглушку, обеспечивающую герметизацию внутренней полости раскосов (рис. 1, б).

Еще одна характерная особенность: в узлах стойки башни трещины образуются с двух сторон фасонки, развиваясь по глубине и продвигаясь навстречу друг другу. Трещины развиваются по границе перехода от углового сварного шва, соединяющего стойку башни с прорезной фасонкой, к основному металлу фасонки. В тех случаях, когда угловые швы с одной и другой стороны фасонки имеют разные катеты, трещины развиваются с соответствующим смещением.

Характерный вид трещиноподобных дефектов, выявленных неразрушающим контролем, приведен на рис. 2.

С целью установления причин зарождения трещиноподобных дефектов в металлоконструкциях НВТ выполнены металлографические и фрактографические исследования. Темплеты фасонки с предполагаемыми трещинами вырезаны на отметках 36Ж+114 (место вырезки показано на рис. 3) – темплет № 1 и 36Д1+107 (схема вырезки показана на рис. 4) – темплет № 2, соответственно. Согласно документации, металл фасонки (лист толщиной 12 мм) – низкоуглеродистая строительная сталь класса С255.

Для идентификации материала фасонки был проведен анализ химического состава основного металла фасонки (оптико-эмиссионный спектрометр Q2 ION на базе CCD детекторов) результаты которого представлены в таблице.

По химическому составу (содержанию марганца) заявленный металл фасонки не удовлетворяет требованиям, предъявляемым ГОСТ 380-94 к сталям марок Ст3Гпс и Ст3Гсп (аналогов стали С255), хотя, согласно ГОСТ 27772-88, удовлетворяет стали С255 (таблица). Кроме того, для точной идентификации марки стали фасонки были



Рис. 1. Примеры развития трещин в узлах раскосов башни (а, б — см. в тексте)

проведены механические испытания, результаты которых подтвердили их соответствие стали С255 (согласно требованиям ГОСТ 1497-84). Проведенные при температуре 20 °С механические испытания стандартных гладких образцов показали средние значения предела прочности 453 МПа, предела текучести 285 МПа, относительного удлинения 31,7 и относительного сужения 54,4.

С целью анализа (выяснения) причин и механизмов образования трещиноподобных дефектов в конструкции выполнены комплексные исследования представленных темплетов в районе сварных соединений, включающие визуальный осмотр, металлографический анализ на оптическом инвертированном микроскопе «AXIOVERT 40-MAT» и фрактографический анализ на модернизированном растровом электронном микроскопе РЭМ-100У.

Вырезку образцов для металлографических исследований проводили в плоскости поперечного сечения *S-T* фасонки перпендикулярно плоскости прокатки листа *L-T*, (где *L* — направление прокатки, совпадающее с продольным направлением сварного шва; *T* — направление в плоскости прокатки; *S* — направление, перпендикулярное к плоскости прокатки).

Темплет №1 в состоянии поставки по одной из сторон вырезан в плоскости трещины *L-S* вдоль углового сварного шва перпендикулярно плоскости прокатки листа фасонки *L-T* (рис. 5). Поверхность трещины в плоскости реза покрыта продуктами коррозии и поэтому перед фрактогра-

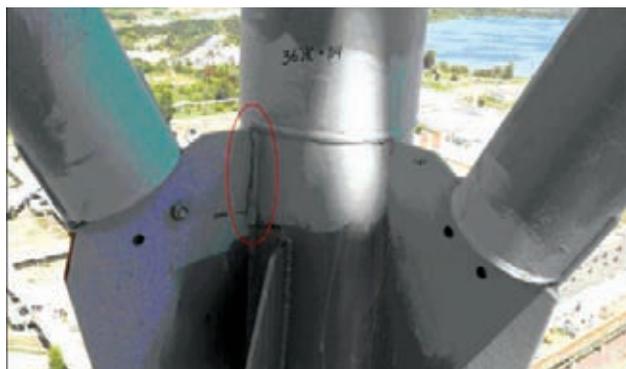


Рис. 2. Трещиноподобные дефекты в узле примыкания раскосов к стойке башни



Рис. 3. Узел примыкания раскосов к стойке башни после вырезки темплета № 1

фическим исследованием провели ультразвуковую очистку поверхностей от продуктов коррозии в ультразвуковом диспергаторе УЗДН, используя 2%-ный спиртовой раствор щавелевой кислоты, а затем чистый этиловый спирт. На рис. 5, в показан фрагмент фасонки в плоскости трещин *L-S* после снятия защитного слоя с внешних поверхностей листа и очистки поверхностей трещин от продуктов коррозии.

Фрактографические исследования поверхностей раскрытых трещин в плоскости реза позволили выявить очаги зарождения и механизмы распространения трещин в сварном соединении темплета № 1, хотя сама зона сварного шва в темплете отсутствует. На основании фрактографических исследований трещины идентифицируются как усталостные, зарождающиеся на поверхностных дефектах. Очаги усталостных трещин отмечены стрелками на рис. 5, в. На рис. 6 представлен характерный фрагмент фрактограммы фасонки с усталостной трещиной (с очагом зарождения, характерным рельефом разрушения и следами остановки фронта усталостной трещины). Магистральная трещина образовалась в результате слияния нескольких усталостных трещин, которые возникли из разных очагов на внешней поверхности фасонки и проросли вглубь образца на 5...6 мм (приблизительно на половину толщины листа фасонки). На некоторых участках изло-



Рис. 4. Схема вырезки темплета № 2 (трещиносодержащий фрагмент фасонки с полной структурой шва до конца обнаруженной трещины)



Химический состав металла, мас. %

Источник данных	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Co
Q2 ION спектрометр	0,146... ...0,158	0,134... ...0,17	0,60... ...0,62	<0,03	<0,010	0,026... ...0,032	<0,010	<0,010	<0,005	0,047	0,016
ГОСТ 27772-88 (С255)	≤0,22	0,15... ...0,30	≤0,65	≤0,04	≤0,05	≤0,30	—	≤0,30	≤0,30	—	—
ГОСТ 380-94 (Ст3Гпс)	0,14... ...0,22	≤0,15	0,8...1,1	≤0,04	≤0,05	≤0,30	—	≤0,30	≤0,30	—	—
ГОСТ 380-94 (Ст3Гсп)	0,14... ...0,20	0,15... ...0,30	0,81,1	≤0,04	≤0,05	≤0,30	—	≤0,30	≤0,30	—	—

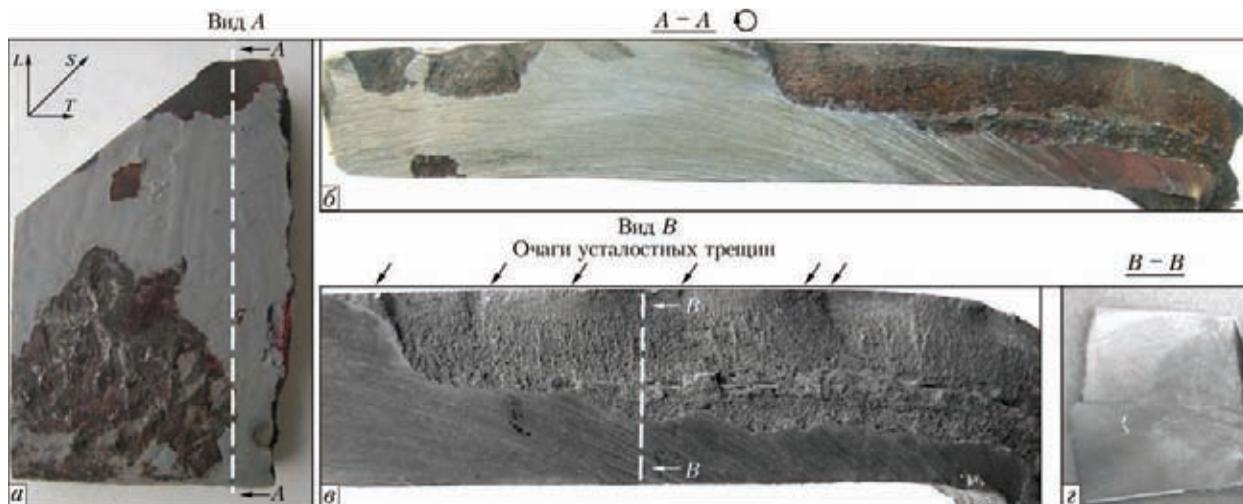


Рис. 5. Темплет № 1 с раскрытой трещиной: а — внешний вид темплета; б, в — фрагмент фасонки в плоскости трещин L-S соответственно до и после очистки поверхности трещин от продуктов коррозии (сечение A-A фасонки); г — плоскость микрошлифа в плоскости S-T (сечение B-B фасонки)

ма наблюдаются крупные глобулярные неметаллические включения по размеру соизмеримые с ферритом основного металла (ОМ) фасонки (возможно, трещина в таких местах пересекала зону сплавления).

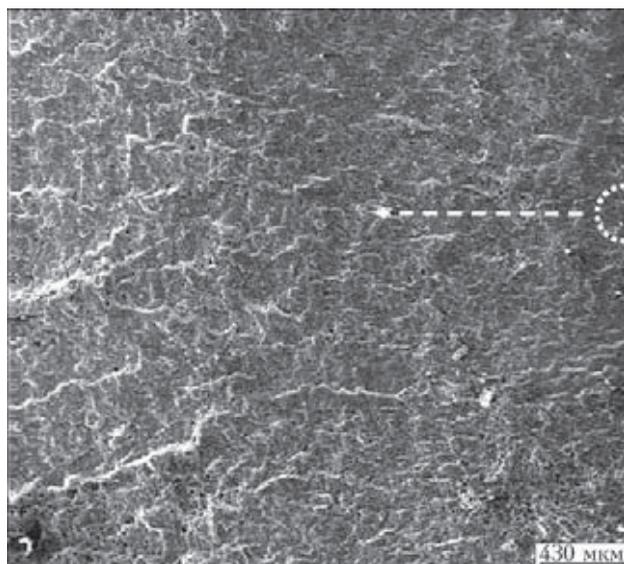


Рис. 6. Фрактограмма фасонки (темплет № 1) в плоскости L-S с усталостной трещиной (белым контуром обозначен очаг усталостной трещины, стрелка — направление фронта трещины)

Как показали металлографические исследования фрагментов профиля трещины в плоскости S-T одного из поперечных сечений, трещина зарождалась на внешней поверхности фасонки на участке крупного зерна зоны термического влияния (ЗТВ).

Причем вдоль линии профиля первичной трещины (в поперечном сечении сварного соединения) наблюдаются мелкие вторичные микротрещины расщеля длиной несколько микрометров, ориентированные вдоль текстуры прокатки, а на расстоянии порядка 5 мм от внешней поверхности образовалась уже протяженная вторичная трещина расщеля порядка 450...500 мкм (рис. 7), также обусловленная текстурой прокатки. Она распространялась вдоль вытянутых перлитных колоний и сульфидных включений, которые наблюдаются в исследуемом сечении темплета (см. увеличенный фрагмент на рис. 7).

На рис. 8 изображен фрагмент темплета № 2 сварного соединения в плоскости S-T после травления в 4%-ом растворе азотной кислоты в этиловом спирте с обозначением участков сварного шва (СШ), ЗТВ и ОМ.

Микроструктура ОМ фасонки представляет ферритно-перлитную смесь полиэдрического фер-

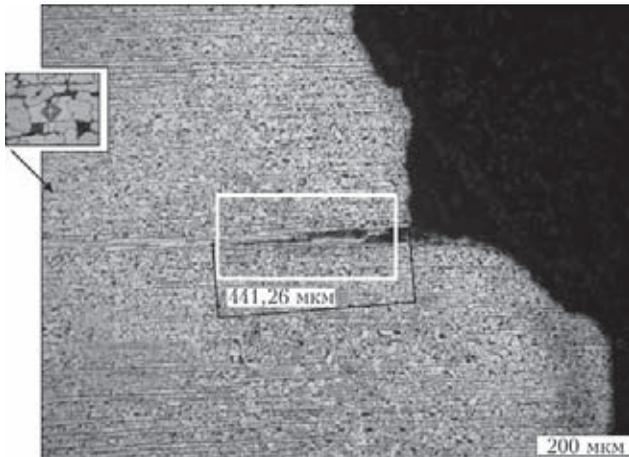


Рис. 7. Фрактограмма вторичной трещины расслоя фасонки рита с незначительным количеством мелкозернистого перлита. При общей разноразмерности феррита (14...30 мкм) средний размер ферритных зерен составляет 20...25 мкм. В ферритных зернах наблюдается высокая плотность мелкодисперсного карбида. Для ОМ фасонки характерна полосчатая структура прокатки. Измерение микротвердости при нагрузке 0,5 Н проведено на микротвердомере Т-Dugscan-20 согласно ГОСТ 9450–84. Микротвердость зерен феррита в ОМ, в зависимости от плотности мелкодисперсного карбида в них, колеблется в пределах HV 1500...1670, а перлита : $HV \sim 1770...1930$ МПа.

В зонах сварных швов дефекты в виде микротрещин не обнаружены. Микроструктура металла сварных швов представляет столбчатые кристаллиты с характерной направленной ориен-

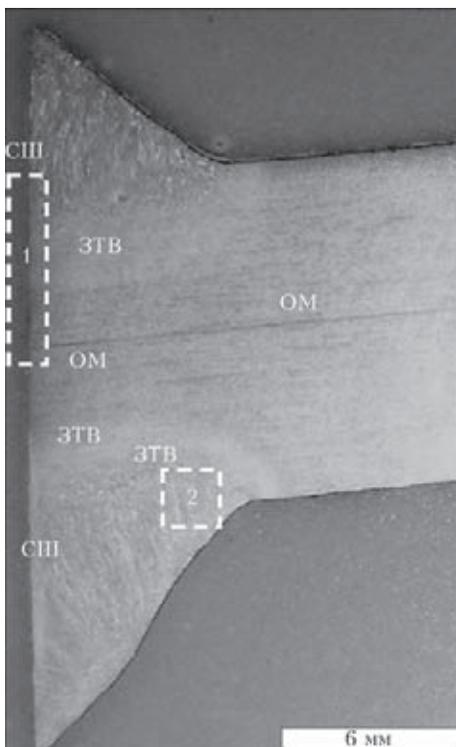


Рис. 8. Фрагмент микрошлифа сварного соединения (темплет № 2) в плоскости $S-T$

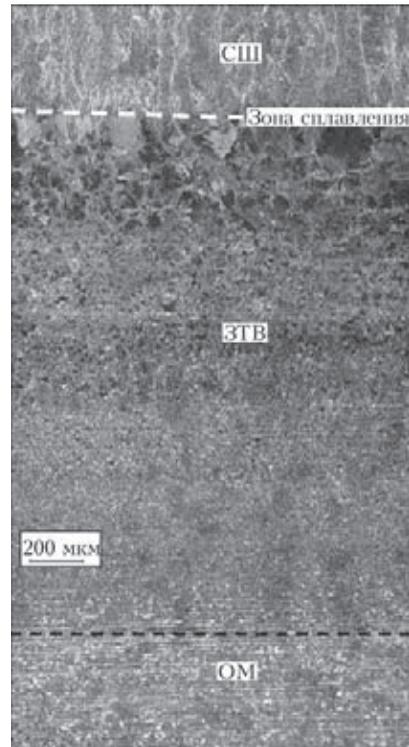


Рис. 9. Панорамное изображение фрагмента микроструктуры (темплет № 2) участка 1 на рис. 8

тацией, указывающей на направленность кристаллизации из жидкого состояния. Микротвердость столбчатых кристаллов при нагрузке 1 Н составляет в среднем $HV \sim 2350$ МПа.

Панорамное изображение фрагмента микроструктуры участка 1 (см. рис. 8), включающее структуру СШ, зоны сплавления, ЗТВ и ОМ фасонки, представлено на рис. 9. Возле зоны сплавления в ЗТВ расположен участок перегрева (участок «крупного зерна» шириной порядка 400...600 мкм), зерна которого характеризуются видманштеттовой структурой с пониженными механическими свойствами. Общая ширина ЗТВ — в пределах 900...2900 мкм.

При детальном исследовании микроструктуры сварного соединения в плоскости $S-T$ микрошли-



Рис. 10. Фрагмент микроструктуры (темплет № 2) участка 2 на рис. 8 (точечный контур — область микротрещин)

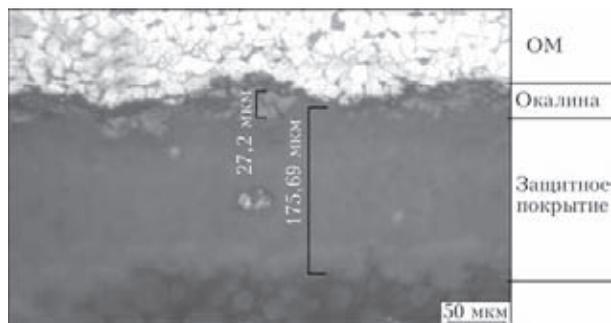


Рис. 11. Фрагмент сечения фасонки с окалиной и защитным покрытием

фа вблизи зоны сплавления обнаружены две микротрещины размером 50...60 мкм, зародившиеся на концентраторе в виде дефекта внешней поверхности темплета в области крупного зерна ЗТВ (рис. 10). Такие мелкие трещины вряд ли удалось бы обнаружить другими методами, ввиду шероховатости внешней поверхности и наличия на ней слоя окалины. Как показали исследования, толщина слоя окалины на поверхности фасонки достигает в отдельных местах 30 мкм, а толщина защитного покрытия — 180 мкм (рис. 11).

Приведенные выше данные позволяют сделать вывод о том, что за образование и развитие трещин отвечают усилия в раскосах башни, поскольку именно от усилий в раскосах в прорезных фасонках возникают напряжения, характер распределения которых полностью согласуется с закономерностями развития трещин в узлах башни. Однако, если предположить, что в раскосах башни имеют место только продольные усилия, вызванные нагрузками, действовавшими за время эксплуатации сооружения, то вызываемые ими напряжения никак не могли привести к выявленным повреждениям. Образование и развитие трещин с двух сторон прорезных фасонки в узлах стоек башни и образование трещин в узлах сопряжения раскосов с распоркой свидетельствует о том, что в этих узлах имеют место изгибные напряжения, которые могут быть вызваны только соответствующими усилиями в раскосах.

Тот факт, что в фасонках стоек трещины зарождаются и развиваются по границе перехода от сварного соединения к основному металлу, а по толщине металла трещины развиваются перпендикулярно его поверхности, а также различие в размерах трещин в разных узлах, свидетельствует об их усталостном происхождении. Это убедительно подтверждается и приведенными выше фрактографическими исследованиями, в частности характерной поверхностью излома, наличием очагов зарождения трещин усталости, бороздками, характерными для остановки и страгивания трещин (см. рис. 5, 6).

Следовательно, с позиций прочности сварных конструкций нет никаких сомнений, что выявленные в узлах башни НВТ трещины носят усталостный характер и вызваны изгибными напряжениями, которые возникают при колебании раскоса из плоскости панели башни. При этом в зоне трещины должны возникать периодические усилия, вызывающие циклические напряжения, достаточные для того, чтобы привести к зарождению и развитию трещин усталости. Заметим, что для образования трещин потребовалось менее семи месяцев эксплуатации башни. Поэтому образование трещин возможно только в том случае, если раскосы при определенных, реально существующих скоростях ветра входят в резонанс, а возникающие при этом усилия и напряжения способны вызвать усталостные разрушения в узлах. Еще один довод в пользу именно этой причины возникновения повреждений состоит в том, что в трех верхних ярусах башни гибкость раскосов самая большая. Это объясняет и то, что именно в этих ярусах обнаружены трещины.

Вместе с тем нельзя обойти вниманием точку зрения по рассматриваемой проблеме специалистов фирмы «Бехтель» (США), проводивших независимое исследование дефектосодержащих конструктивных элементов НВТ [4]. К проведению исследования были привлечены два специалиста в области металлургии и один — в области технологии сварки и неразрушающего контроля. В самом начале своего исследования авторы делают вывод о том, что «проект исключается в качестве причины возникновения дефектов», мотивируя это тем, что с момента завершения строительства и до обнаружения трещин сооружение не подвергалось расчетным нагрузкам. Этим самым авторы исследования существенно ограничили область поиска причин возникновения трещин в узлах башни. Если априори исключается конструктивный фактор, то ничего другого, кроме технологического фактора, для объяснения причин разрушения просто не остается. В процессе исследования было установлено, что в фасонке толщиной 12 мм, вырезанной вместе с угловым швом из узла на отметке 100 м, использована сталь класса С345, в то время как проектом предусмотрена сталь класса С255. Само по себе это принципиального значения не имеет, но в сварном шве и околошовной зоне была установлена повышенная твердость (HV до 3985 МПа) и «небольшое количество мартенсита в околошовной зоне», что может свидетельствовать о повышенной скорости охлаждения сварного соединения. На основании сказанного делается заключение, что «наиболее вероятной причиной образования трещин является водородное растрескивание». Авторы



понимают, что повышенная твердость и наличие мартенсита в околошовной зоне сами по себе не могут вызвать холодных трещин, поэтому выдвигается предпосылка, что на заводе-изготовителе сварка выполнялась «в условиях дождя, снега, высокой влажности или сильного ветра». Конечно, с таким заключением согласиться трудно, хотя авторы и высказывают его достаточно осторожно. Во-первых, условия сварки по всей длине фасонки, надо полагать, были одинаковы, а трещины во всех случаях имеют место там, где усилие передается от раскоса, т. е. в верхней части фасонки. Во-вторых, холодные трещины расположены преимущественно в ЗТВ, т. е. по зоне сплавления СШ, а рассматриваемые трещины развиваются перпендикулярно поверхности фасонки, и наконец, ни в одних исследованиях наличия холодных трещин ни в СШ, ни в ЗТВ не обнаружено. Кроме того, трещины имеют место как в фасонках, выполненных из стали класса С345, так и в фасонках, выполненных из стали С255, хотя авторы рассматриваемого исследования убеждены, что в стали класса С255 трещин не будет.

Для определения условий возникновения резонансных колебаний раскосов, их частотных характеристик, а также уровней возникающих при этом циклических напряжений, был выполнен комплексный расчет раскосов на ветровую нагрузку, которую рассматривали как возмущающий фактор, вызывающий резонансные колебания.

Заметим, что приведенных выше данных, основанных на результатах обследования и фрактографических исследованиях поверхности излома, вполне достаточно, чтобы сделать однозначный вывод о причинах и характере возникших трещин.

Расчет, приведенный ниже, является лишь инструментом, объясняющим достаточно очевидные для специалистов факты, и рассматривать его как самостоятельный критерий для принятия ответственного решения можно только будучи абсолютно уверенным в его корректности. Авторы вынуждены обратить внимание на это, поскольку недостаточно корректно выполненный расчет приводит к ошибочным выводам.

Основные этапы и порядок выполнения расчетов. Согласно приведенным выше результатам металлографического анализа фрагментов фасонки, определено, что механизм, вызвавший образование и развитие трещин, носит усталостный характер.

Анализ исходных данных позволил исключить из рассмотрения некоторые виды нагрузок (учтенные при проектировании НВТ), а именно: смерч класса 3, землетрясение 5 и 6 баллов, снеговая нагрузка, температурное воздействие. Поскольку за время эксплуатации НВТ (с момента ее ввода в эксплуатацию и до появления трещин в фасонках) одни из указанных выше нагрузок отсутствовали вообще, другие не превышали своих расчетных значений, а повторяемость их была незначительна, они не могли послужить причиной образования трещин.

Принимая во внимание, что для высотных сооружений именно ветровая нагрузка, как динамический возмущающий фактор, является основной, рассмотрено влияние ветрового потока на напряженно-деформированное состояние НВТ и ее отдельных конструктивных элементов.

Решение задачи выполнено в несколько этапов, с использованием аэродинамических и прочностных численных моделей. Это обусловлено

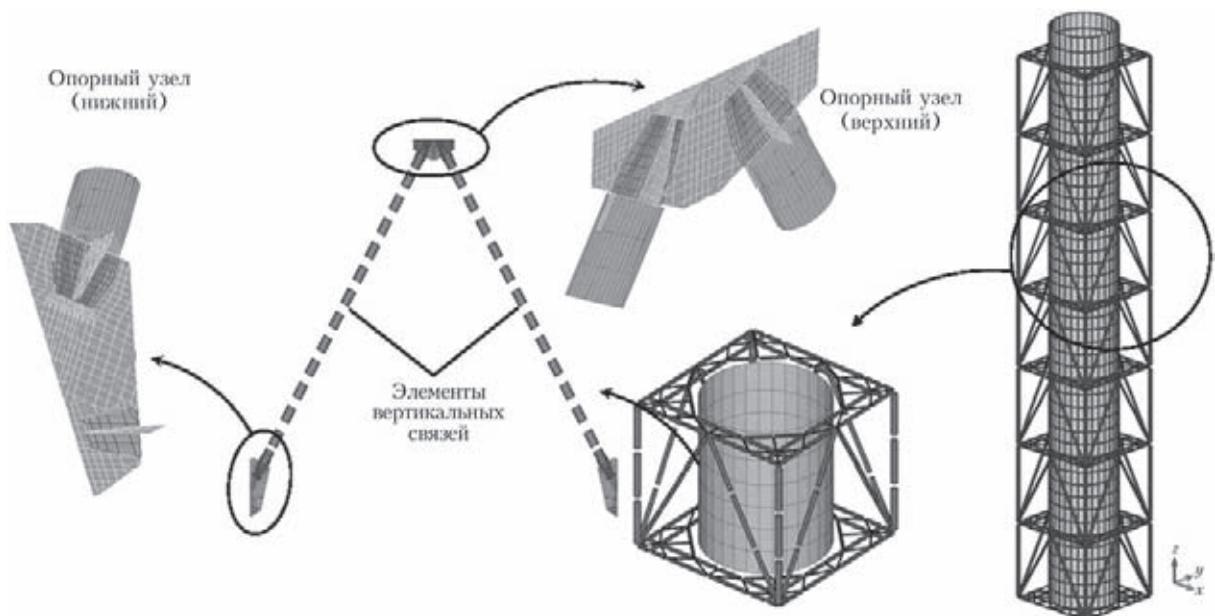


Рис. 12. Конечно-элементные модели НВТ

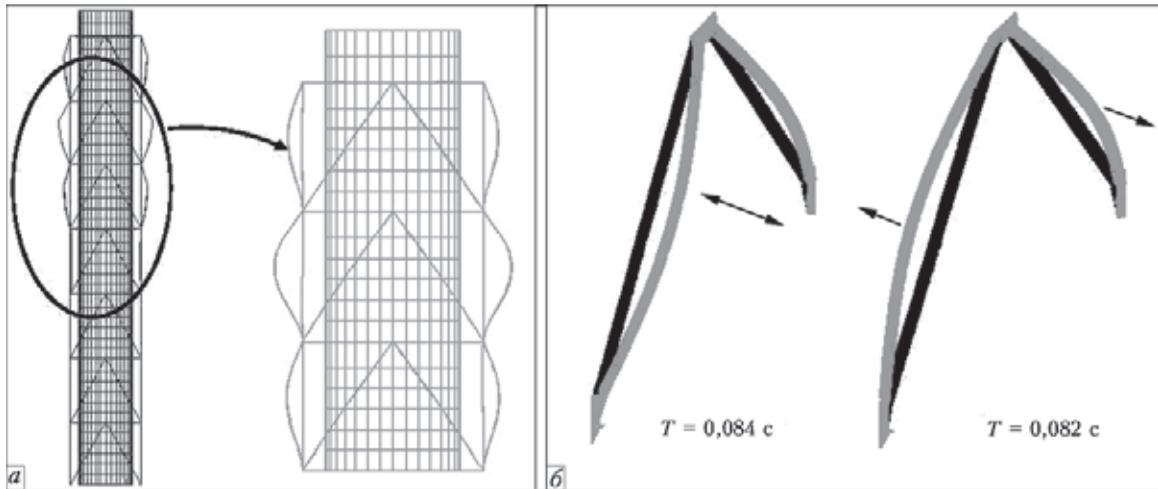


Рис. 13. Формы собственных колебаний (а, б — см. в тексте)

достаточно сложным характером взаимодействия ветрового потока и строительных конструкций – взаимным влиянием соседних, конструктивных элементов на распределение скоростей и ветровых напоров и т. д.

В результате расчета пространственных оболочечно-стержневых конечно-элементных моделей (рис. 12) определены формы и периоды собственных колебаний системы.

При детальном анализе полученных результатов выявлено, что в ряде случаев формы собственных колебаний НВТ образованы групповым деформированием раскосов трех верхних секций (рис. 13, а). Колебания раскосов характеризуются их выпучиванием из плоскости граней. Характерные формы колебания раскосов и соответствующие им величины периодов собственных колебаний приведены на (рис. 13, б).

Для определения критической скорости ветрового потока $v_{кр}$, способной вызвать ветровой резонанс в раскосе, воспользуемся формулами, приведенными в [5]. В первом приближении принимаем, что критическая скорость ветра, вызывающая резонансные колебания в направлении, перпендикулярном ветровому потоку, равна:

$$v_{кр} = \frac{d}{T_i Sh} = \frac{0,194}{0,084 \cdot 0,2} = 11,6 \text{ м/с} \approx 12 \text{ м/с},$$

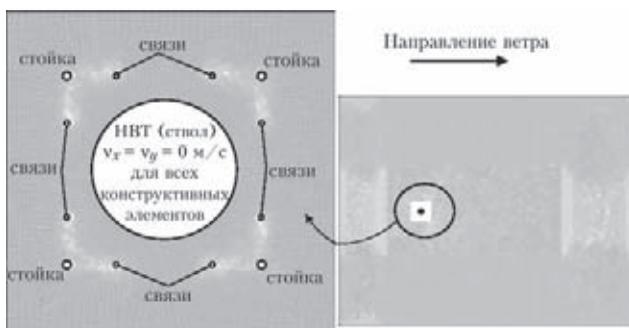


Рис. 14. Аэродинамическая модель. Общий вид, нагрузки и граничные условия ($v_x = 12$, $v_y = 0$ м/с, $P = 0$ Па)

где $T_i = 0,082$ с — период собственных колебаний раскоса по i -й форме; $Sh = 0,2$ — число Струхаля для круглого сечения; $d = 0,194$ м — диаметр элемента связи (труба 193,7×6 мм) в трех верхних уровнях башни.

Используя в качестве исходных данных значение критической скорости $v_{кр} = 12$ м/с ветрового потока, с помощью аэродинамической модели (рис. 14) определен характер распределения ветрового потока и давления по поверхностям конструктивных элементов НВТ.

Выполненный расчет показал, что конструктивные элементы башни и ствола НВТ оказывают влияние на параметры распределения ветрового потока вокруг ствола башни и элементов вертикальных связей. Увеличение скорости ветрового потока вдоль боковой поверхности ствола (рис. 15) приводит к тому, что раскосы, расположенные в этой зоне, подвергаются воздействию повышенных значений ветрового давления (рис. 16).

Кроме этого, взаимное влияние конструктивных элементов башни НВТ приводит к тому, что спутные струи, возникающие позади раскосов (вертикальных связей), попадают в кильватерные струи потоков, образованных угловыми стойками башни. В результате этого спутные струи вертикальных связей подвергаются турбулизации практически сразу после отрыва потока и между находящимися на некотором расстоянии друг от друга слоями со сдвигом образуется турбулентный след.

В работах [1, 6] отмечено, что наиболее опасны колебания неизолированного цилиндра, т. е. расположенного в кильватерной струе другого или параллельно другим цилиндрам. При этом вибрация раскосов возникает значительно легче – при меньшей скорости потока и может поддерживаться в широком диапазоне скоростей, а не в определенном интервале, поэтому она более опасна. Согласно [1], действующие на сооружение аэродинамические силы изменяются по гармониче-

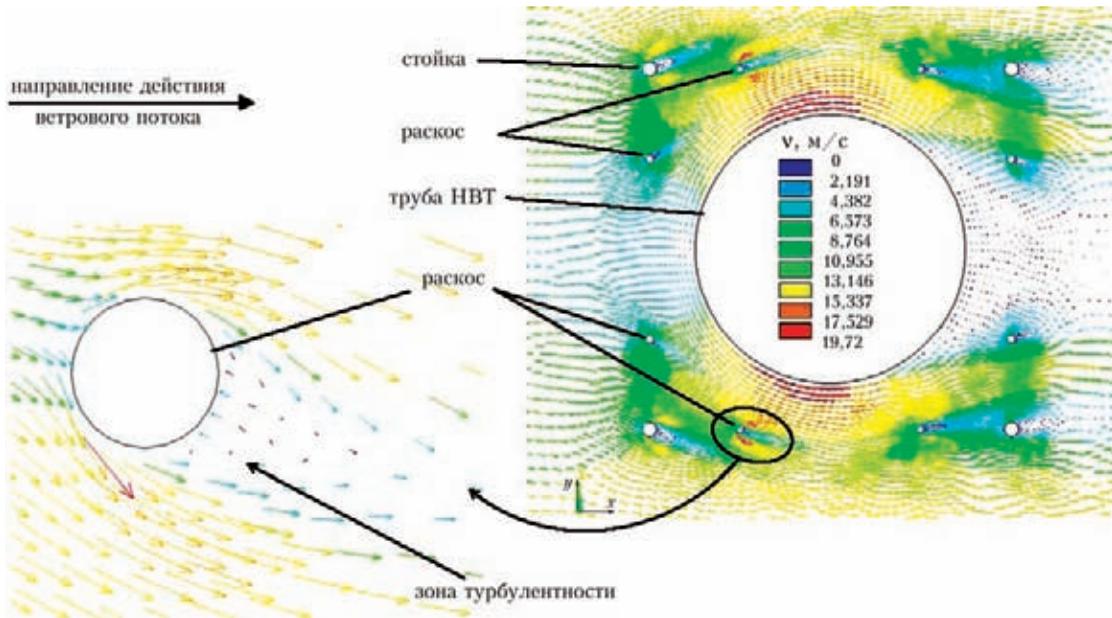


Рис. 15. Направление векторов скорости ветрового потока

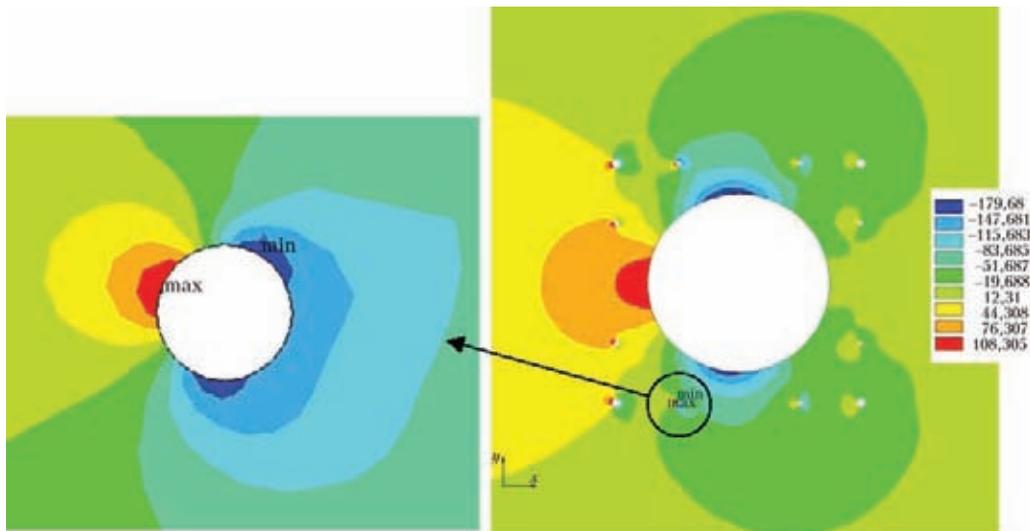


Рис. 16. Изополя ветрового давления

скому закону. В связи с этим, для определения степени влияния ветрового потока на прочностные характеристики опорных элементов вертикальных связей, выполнен гармонический анализ конструкции.

В качестве исходных данных, при определении значения возмущающей силы (амплитуды интенсивности), действующей на элементы вертикальных связей, использовали результаты, полученные при решении аэродинамической задачи.

В результате расчета уточненной модели действия гармонической силы (амплитуда интенсивности F_0), моделирующей динамическое воздействие ветровой нагрузки, в опорных фасонках и других конструктивных элементах рассматриваемого фрагмента сооружения определены значения напряжений и деформаций.

Анализ полученных результатов показал, что действующие силы вызывают отклонение опор-

ных фасонки из плоскости. Схемы деформирования опорных фасонки приведены на рис. 17.

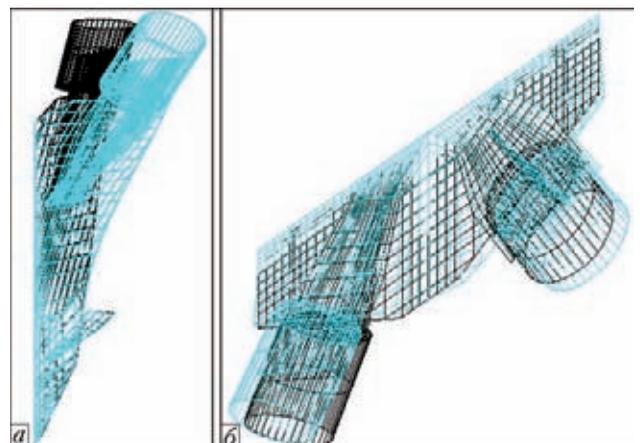


Рис. 17. Схемы деформирования опорных фасонки: а — нижняя; б — верхняя фасонки

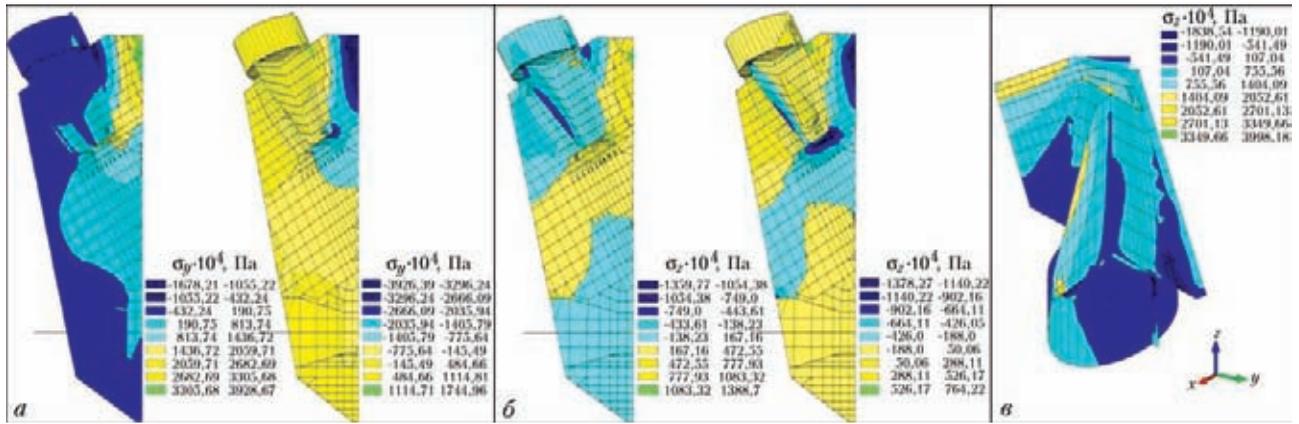


Рис. 18. Изополя напряжений на лицевых поверхностях нижнего (а, б) и верхнего (в) опорных узлов

Изгиб нижних опорных фасонки приводит к образованию на их лицевых поверхностях напряжений, достигающих значений $\sigma_y = \pm 38,56$ МПа. Области с наибольшими напряжениями расположены в верхней зоне опорных фасонки, на участке их примыкания к стойкам башни. Кроме этого, увеличение напряжений наблюдается на участках с переменными жесткостями — зонах сопряжения опорных фасонки с фасонками раскосов. Изополя напряжений σ_y и σ_z в опорных узлах приведены на рис. 18.

В верхнем узле раскоса, на участке примыкания ребра жесткости к торцевой заглушке, наблюдается зона с ярко выраженным концентратором напряжений. Схема деформирования и изополя напряжений σ_z на лицевых поверхностях в зоне верхнего опорного узла приведены на рис. 18, в. Напряжения на этих участках достигают значения $\sigma_z = 39,9$ МПа.

Дополнительные исследования и расчеты. В результате дополнительных исследований выявлены следующие факты.

1. Принимая во внимание, что коэффициент поперечной силы C_y , используемый при определении возмущающей силы, является теоретически минимально возможным и на практике достигает

больших значений, был выполнен расчет уточненной модели для $C_y = 0,3$.

Выполненные расчеты показали, что характер распределения напряжений в элементах конструкции остался аналогичным изополям, полученным ранее. При этом значения напряжений на лицевых поверхностях нижних опорных фасонки увеличились на 25 % (до 49 МПа). Увеличение значений напряжений также отмечено в верхнем опорном узле.

2. Конструктивные решения опорных узлов во всех секциях башни НВТ идентичны, поэтому проведена оценочная проверка опорных узлов железобетонных секций.

Расчеты показали, что для вертикальных связей, выполненных из круглой трубы 219×6 мм, период первой формы собственных колебаний $T = 0,07$ с, а критическая скорость $v_{кр} = 15,5 \dots 16$ м/с. Амплитуда напряжений по модулю в опорных фасонках, в зависимости от значения динамического коэффициента C_y , может изменяться от 31 до 39 МПа.

Для элементов вертикальных связей, выполненных из круглой трубы 245×8 мм, $T = 0,06$ с, $v_{кр} = 20,5 \dots 21,0$ м/с.

Полученные значения критических скоростей ветрового потока не отмечены в статистических данных скоростей ветра, полученных на метеостанции Чернобыль за прошедший период. При этом предоставленная информация о скоростях ветра выполнена в виде почасовых замеров, что вносит некоторый параметр усреднения. В работе [7] отмечено, что средняя скорость усреднения ветра зависит от времени усреднения. При уменьшении интервала усреднения максимальное значение средней скорости, соответствующее этому интервалу, увеличивается. К примеру, разница между средней почасовой скоростью и средней скоростью за период 20 с может отличаться в два раза. Таким образом, для секций третьего-четвертого уровня вероятна скорость ветрового потока $v = 15 \dots 16$ м/с.



Рис. 19. Общий вид конструкции башни НВТ



3. Учитывая, что число Струхала носит ориентировочный характер и может для различных форм поперечных сечений меняться в определенном диапазоне (для цилиндров принято $Sh = 0,2$, хотя на практике — $Sh = 0,185 \dots 0,22$), внешние нагрузки могут менять свои значения в еще большем диапазоне, что, в свою очередь, приводит к еще большему увеличению напряжений в опорных элементах каркаса башни НВТ.

Оценка напряжений в прорезной фасонке, вызванных резонансными колебаниями раскосов. Расчетные значения циклических напряжений, возникающих в прорезной фасонке у границы углового сварного шва приварки ее к трубе стойки, рассмотрены на соответствие действующим в Украине нормам [8] и рекомендациям Международного института сварки [9].

Согласно [8] предел усталости R_p для 5-й группы элементов, к которым может быть отнесено соединение прорезной фасонки со стойкой при остаточных напряжениях в зоне образования трещин более $0,5 \sigma_T$ для симметричного цикла нагружения $R_{\sigma_{-1}} = 16,83$ МПа. Заметим, что согласно норм [8] предел усталости определяется на базе 10^7 циклов нагружения.

Поскольку в фасонке циклические напряжения в условиях резонансных колебаний раскоса составляют ± 39 МПа, то ожидать появления трещин можно при долговечности $8,04 \cdot 10^5$ циклов нагружения. С учетом частоты колебания раскоса в условиях резонанса (12,2 Гц) для образования трещин усталости достаточно 20 ч эксплуатации.

Согласно методике Международного института сварки для характерных типов сварных соединений приводятся предельные значения размахов напряжений на базе $2 \cdot 10^6$ циклов нагружений. Для соединения близкого к тому, которое имеет место в башне НВТ, предельное значение размаха напряжений составляет 45 МПа.

Поскольку в фасонке значение размаха напряжений составляет 78 МПа, долговечность, при которой можно ожидать появления трещин усталости, составляет, согласно этой методике, $384 \cdot 10^3$ циклов нагружений.

Приведенные данные еще раз подтверждают усталостную природу возникновения трещин в узлах башни НВТ.

Анализируя причины образования трещин в узлах башни НВТ, нельзя уйти от оценки принятых конструктивных решений. Несущий каркас башни НВТ выполнен из цилиндрических труб (рис. 19).

Выбор этого типа сечений для конструктивных элементов башни вполне оправдан, поскольку позволяет снизить ветровые нагрузки на сооружение, увеличить расчетную длину элементов,

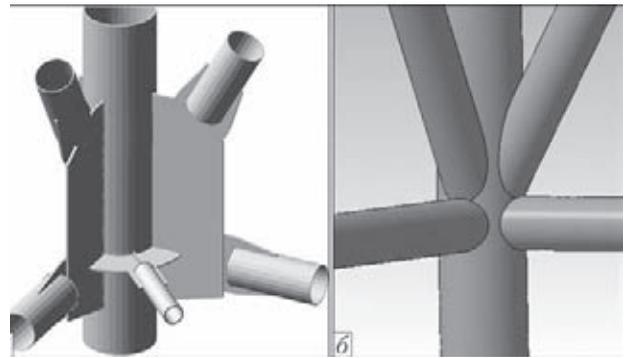


Рис. 20. Схемы узлового соединения конструктивных элементов башни НВТ со стойкой: а — с прорезными фасонками; б — с непосредственным примыканием

а, следовательно, снизить вес сооружения и его стоимость. Кроме того, трубчатые элементы обладают повышенной сопротивляемостью коррозии, благодаря хорошей обдуваемости и малой площади поверхности. Однако эти преимущества полностью могут быть реализованы только при рациональном решении узловых соединений. Известно, что в конструкциях из труб узловые соединения в ряде случаев определяют прочность и надежность всего сооружения [10].

В последние десятилетия, в связи с использованием цилиндрических труб в качестве несущих элементов морских стационарных платформ и других ответственных сооружений, выполнен большой объем исследований, направленных на разработку оптимальных конструктивных решений узлов, методов оценки их прочности при статическом и циклическом нагружении. Показано, что наиболее рациональным решением является непосредственное примыкание элементов решетки к стойке. Конструкция имеет высокую прочность, низкую концентрацию напряжений, малое количество сварных соединений, высокую сопротивляемость коррозии. Для таких узлов разработаны нормативные документы по расчету их прочности [11, 12 и др.] при статическом и циклическом нагружении. Для сравнения приведем узел башни НВТ и узел, соответствующий современным представлениям о проектировании конструкций из труб (рис. 20). Если бы проект башни НВТ был выполнен на современном уровне, удалось бы избежать многих недостатков.

Выводы

1. Трещины в узлах башни НВТ ЧАЭС носят системный характер. Они образовались в зонах сварных узловых соединений трех верхних ярусов башни с элементами решетки из труб сечением $193,7 \times 6$ мм. Трещины выявлены в 17 узлах прорезной фасонки стойки и в 17 узлах крепления раскосов к распорке.



2. Не вызывает сомнений, что появление трещин вызвано циклическими усилиями, действующими в раскосах. Это подтверждается характерными местами их образования и наличием трещин с обоих концов раскосов.

3. Трещины имеют усталостное происхождение, зарождаются в фасонках стоек на внешней поверхности с двух сторон, распространяются вдоль границы сварного шва от верхнего края фасонки и в глубину. Фрактографические исследования поверхностей излома выявили очаги зарождения, характерный рельеф усталостного разрушения и следы остановки усталостной трещины. В узлах распорок трещины также имеют характерные признаки усталостного разрушения.

4. Аэродинамический и прочностной расчеты сооружения и отдельных его элементов убедительно показали, что причиной возникновения трещин являются резонансные колебания раскосов в верхних трех секциях башни, направленные из плоскости граней и вызывающие переменные изгибные напряжения в узлах. Определены частоты колебаний и усилия, передаваемые на узлы.

5. Поля напряжений, вызванные периодическими усилиями в раскосах, подтверждают зону образования и развития усталостного разрушения, а максимальные уровни напряжений значительно превосходят пределы усталости сварных соединений.

6. Расчет показал, что опасность с точки зрения зарождения усталостных трещин представляют раскосы, выполненные из труб сечением 219×6 мм. При разработке ремонтного проекта башни НВТ на это следует обратить внимание.

7. В проекте башни использованы устаревшие конструктивные решения узлов, для которых характерны многочисленные зоны высокой концентрации напряжений, низкое сопротивление усталости и низкая сопротивляемость коррозионным воздействиям.

1. *Савицкий Г. А.* Ветровая нагрузка на сооружения. — М.: Стройиздат, 1972. — 108 с.
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.
3. *Экспертиза* причин возникновения трещиноподобных дефектов в новой вентиляционной трубе: (Отчет) / ООО «УкрАтомэнерго». — Киев, 2012. — 50 с.
4. *Маклин Д., Кемпбелл Р., Колуэлл Р.* Независимое исследование конструктивных дефектов НВТ: Науч.-техн. отчет. — Киев, 2012. — 40 с.
5. *Руководство* по расчету зданий и сооружений на действии ветра. — М.: Стройиздат, 1978. — 216 с.
6. *Вилькерд Д. С., Попов С. Г., Савицкий Г. А.* Колебания тел в аэродинамическом следе // Вестн. Моск. гос. ун-та. — 1951. — № 12. — С. 23–25.
7. *Симиу Э., Сканлан Р.* Воздействие ветра на здания и сооружения. — М.: Стройиздат, 1984. — 343 с.
8. *ДБН В.2.6-163:2010.* Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. — Чинний з 01.12.11. — К.: Мінрегіонбуд, — 201 с.
9. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components.* — S.I., S.a. — 153 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XIII-1539-96).
10. *Marshall P. W.* Connections for welded tubular structures // Intern. conf. on welding of tubular structures. — Massachusetts: Pergamon Press, 1984. — P. 11–17.
11. *ВСН 51.4–85.* Ведомственные строительные нормы. Бесфасоночные узлы конструкций из труб морских нефтегазопромысловых сооружений. Методика расчета прочности. — Введ. 03.06.1985. — М.: Мингазпром, 1985. — 30 с.
12. *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms.* — S.I., S.a. — 86 p. — (American Petroleum Inst.; Doc. RP2A).

Поступила в редакцию 03.09.2013

Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве / Б.Е. Патон, Г.М. Григоренко, И.В. Шейко и др. — Киев: Наук. думка, 2013. — 488 с.

В монографии приведены научные и прикладные аспекты применения плазменных источников нагрева (плазмотронов) в металлургическом и литейном производстве. Рассмотрены основные типы плазмотронов, используемые для плавки металлов и обработки металлических расплавов в лабораторных и промышленных условиях. Показано промышленное применение плазменных источников нагрева, на базе которых разработаны новые металлургические процессы и технологии. Описаны конструкции плавильных печей на керамическом поду и переплавных печей с формированием слитка в охлаждаемом кристаллизаторе, установок для рафинирующего переплава поверхностного слоя слитков, выращивания монокристаллов тугоплавких металлов и др. Приведены результаты сравнения качества металлов и сплавов, выплавленных с применением различных технологий.

Для научных и инженерно-технических работников металлургических предприятий и литейного производства, а также преподавателей, аспирантов и студентов высшей школы соответствующих специальностей.

