

Напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку корпуса парогенератора при локальной термообработке

Г. В. Степанов^а, В. В. Харченко^а, А. И. Бабуцкий^а, В. И. Кравченко^а,
А. А. Котляренко^а, С. В. Романов^б, Н. Б. Трунов^в, В. В. Денисов^в,
В. А. Пиминов^в

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Ассоциация “Надежность машин и сооружений”, Киев, Украина

^в ОКБ “Гидропресс”, Подольск, Россия

Представлены результаты расчетной оценки напряженно-деформированного состояния узла приварки коллектора к патрубку корпуса парогенератора, возникающего после термообработки, используемой для снятия остаточных сварочных напряжений. Показано, что при такой термообработке, включающей нагрев, выдержку и охлаждение локальной области со сварным швом, в узле формируются дополнительные остаточные напряжения значительной величины.

Ключевые слова: узел приварки, коллектор, парогенератор, сварка, термообработка.

Введение. Для снятия нежелательных остаточных напряжений в элементах конструкций, вызванных предшествующей обработкой, например сваркой, в большинстве случаев используется термообработка (ТО), заключающаяся в нагреве, выдержке при повышенной температуре для релаксации напряжений и последующем охлаждении [1]. Однородный нагрев всего элемента конструкции и выдержка при высокой температуре снижают уровень исходных остаточных напряжений и не наводят каких-либо дополнительных напряжений в процессе последующего охлаждения. Ситуация изменяется при локальном нагреве конструкции из-за развития пластических деформаций как при нагреве, так и при охлаждении, что следует учитывать при разработке режимов ТО.

Оценка остаточных напряжений в конструкции после ТО является одной из наиболее сложных проблем в механике деформируемого твердого тела, поскольку необходимо учитывать процессы пластического деформирования вследствие релаксации напряжений при изменяющемся во времени поле температур и термических напряжений. Исследования по этой проблеме ограничены, что и определяет актуальность их развития.

В данном сообщении в качестве примера рассматривается действие локального нагрева, выдержки и охлаждения при ТО на напряженно-деформированное состояние (НДС) узла приварки коллектора к патрубку парогенератора (ПГ) ПГВ-1000 (рис. 1), используемого в составе реакторных блоков ВВЭР АЭС. Известно, что в последнее время на ряде АЭС России и Украины были зарегистрированы случаи повреждения узлов при сроке эксплуатации парогенераторов ниже расчетного [2, 3]. Ремонтно-восстано-

вительные работы с использованием электродуговой сварки включали ТО узла (его части в области сварного шва) для снятия остаточных сварочных напряжений. Основная задача приводимых результатов расчетов – определение механизма влияния ТО на формирование остаточных напряжений и качественная оценка их уровня после ее проведения. Результаты оценки влияния ТО могут быть использованы для оптимизации режимов ее выполнения.

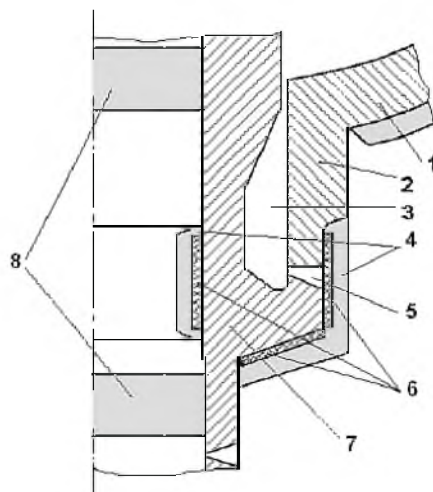


Рис. 1. Схема узла приварки и установки на нем нагревательных элементов: 1 – корпус ПГ с теплоизоляцией; 2 – патрубок; 3 – карман; 4 – теплоизоляция; 5 – сварной шов; 6 – нагревательные элементы; 7 – коллектор; 8 – теплоизолирующие заглушки.

Кинетика НДС при термообработке. Изменение окружных деформации и напряжения на внутренней поверхности патрубка со сварным швом (рис. 1) при нагреве, выдержке при повышенной температуре для релаксации напряжений и последующем охлаждении схематически представлено на рис. 2. Термическое расширение нагреваемой кольцевой области патрубка ПГ сдерживается прилегающими участками, что вызывает возникновение в локальной области, прилегающей к поверхности “кармана”, напряжений сжатия (точка 1). Релаксация напряжений сжатия без изменения общей деформации в процессе выдержки при повышенной температуре приводит к развитию пластической деформации сжатия (изменение НДС по линии 1–2). При последующем охлаждении размеры узла восстанавливаются, и в пластически деформированной кольцевой области формируются остаточные напряжения растяжения (изменение НДС по линии 2–3). Предполагается, что жесткость участков патрубка ПГ, прилегающих к пластически деформированной сжатием (по линии 1–2) кольцевой области, достаточна для восстановления размеров узла при охлаждении. Уровень остаточных напряжений после охлаждения зависит от уровня напряжений в момент прекращения релаксации (точка 2) на стадии охлаждения.

Линией 1–2'–3' (рис. 2) схематически показана кинетика НДС в локальной кольцевой области патрубка в случае полной релаксации напряжений. При этом уровень остаточных напряжений после ТО является макси-

мальным. Однако на практике полной релаксации напряжений при выдержке, как правило, не происходит [1]. Поэтому такая кинетика НДС может рассматриваться только для консервативной оценки остаточных напряжений.

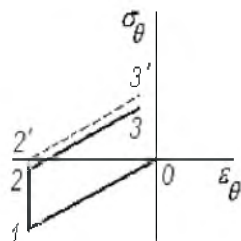


Рис. 2. Изменение НДС в кольцевой области нагрева патрубка при ТО.

Расчетная схема узла приварки. Для численного моделирования кинетики НДС при ТО использовали как упрощенную осесимметричную расчетную схему узла (рис. 1), состоящую из коллектора, патрубка и части корпуса ПГ, так и трехмерную расчетную схему (рис. 3), включающую основные элементы парогенератора в соответствии с конструкторской документацией, за исключением системы теплообменных трубок.

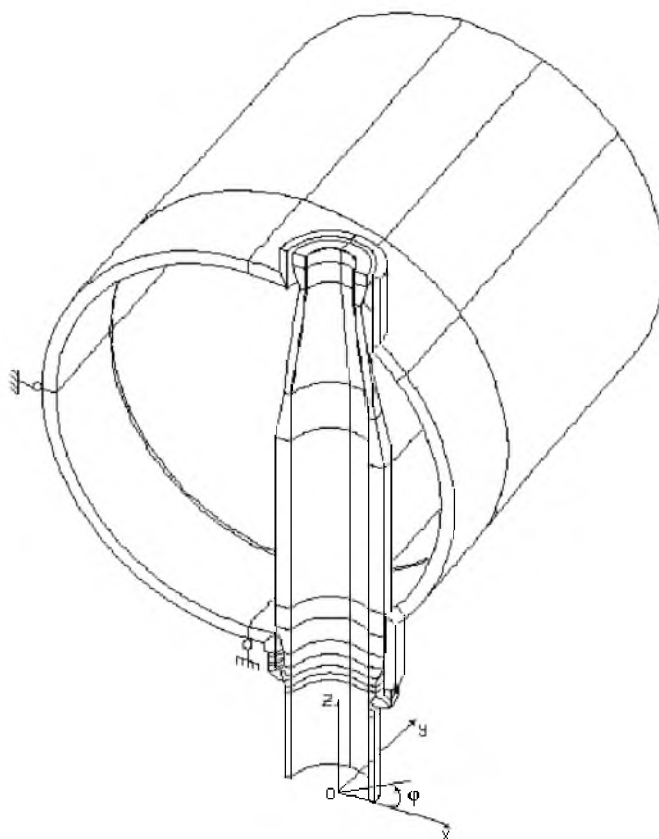


Рис. 3. Расчетная трехмерная модель парогенератора.

В осесимметричной расчетной схеме узла геометрия, размеры коллектора и патрубка соответствовали проектным, за исключением длины утолщенной части патрубка, принятой в расчетах 180 мм. Корпус ПГ моделировали частью сферической оболочки с внутренним радиусом 4000 мм и толщиной стенки 145 мм. Внутренний диаметр патрубка со сварочным швом составлял 1190 мм, толщина стенки в утолщенной части – 72,5 мм.

Кинетику НДС узла приварки при заданном изменении температуры в локальной области оценивали методом конечных элементов (МКЭ) [4, 5], с помощью которого решали нестационарную термоупругопластическую задачу.

Напряженно-деформированное состояние для осесимметричной расчетной схемы узла приварки при его термообработке (рис. 1) определяли для нулевых начальных напряжений. Единственное граничное условие – нулевое перемещение в вертикальном направлении по наружному контуру оболочки, моделирующей корпус ПГ. Термическая нагрузка: линейное повышение температуры (под наружными нагревательными элементами на 630°C, под внутренним – на 530°C, рис. 1) за время 30000 с, выдержка при максимальной температуре в течение такого же времени и последующее охлаждение за 30000 с до температуры 200°C с полным охлаждением в результате конвекции. Данные условия ТО (места установки нагревательных элементов, ее режимы) соответствуют используемым при ремонтных работах, назовем их “базовым” вариантом ТО. Теплообмен через поверхности, на которых отсутствует теплоизоляция, определяли выбором коэффициента конвективного теплообмена $k = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$ при нулевой температуре окружающей среды. Полагали также, что теплообмен между стенкой коллектора и окружающей средой в кармане и объеме между теплоизолирующими заглушками (рис. 1) отсутствует.

Аналогичные условия термического нагружения принимали при моделировании вызванной ТО кинетики НДС в трехмерной постановке.

Расчеты выполняли для узла из стали 10ГН2МФА. При этом полагали, что неупругое деформирование материала определяется уравнением изотропного деформационного упрочнения с учетом влияния температуры в виде

$$\sigma = \sigma_Y(1 + \varepsilon)(1 - T/T^*),$$

где σ_Y – предел текучести; T – температура нагрева; T^* – параметр материала.

Отметим, что параметры уравнения обеспечивают снижение уровня напряжений со значения $\sigma_Y = 350 \text{ МПа}$ до $\sigma = 100 \text{ МПа}$ при повышении температуры до $T = 700^\circ\text{C}$, что обеспечивается при $T^* = 980^\circ\text{C}$. В расчетах полагали, что физико-механические свойства стали 10ГН2МФА (модуль Юнга E , удельные теплоемкость C_V и теплопроводность η и др.), применяемой при изготовлении ПГ, изменяются в зависимости от температуры (таблица). Коэффициент линейного расширения α принимали изменяющимся линейно от $1,1 \cdot 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$ при нулевой температуре до $1,42 \cdot 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$ при 700°C , коэффициент Пуассона составлял 0,29.

Физико-механические свойства стали 10ГН2МФА

$T, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ГПа}$	$C_V, \text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$\eta, \text{Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$
0	205	487	38,0
100	202	505	37,8
200	197	530	37,2
300	190	561	36,2
400	180	600	35,0
500	169	653	33,6
600	155	720	32,0
700	142	870	30,5

Анализ результатов расчетов. Некоторые результаты численного моделирования приведены на рис. 4, 5. Видно, что при выбранных участках нагрева, режимах ТО, параметрах деформационного упрочнения и термического разупрочнения, а также физико-механических свойствах материала локальный нагрев узла вызывает местное расширение нагретого участка и развитие на внутренней поверхности кармана со стороны патрубка пластических деформаций сжатия в осевом и тангенциальном направлении. В областях неупругого сжатия при последующем охлаждении возникают остаточные напряжения растяжения (рис. 4). По данным расчетов результирующее НДС на участке узла приварки, подвергавшемся нагреву, выдержке и последующему охлаждению, характеризуется значительным уровнем растягивающих напряжений. Распределение осевых напряжений на поверхности кармана со стороны патрубка имеет характерный максимум в области галтельного перехода на расстоянии около 17 мм от дна кармана (рис. 4,а). Отметим, что в этой области характер распределения напряжений при действии эксплуатационных нагрузок аналогичный [3].

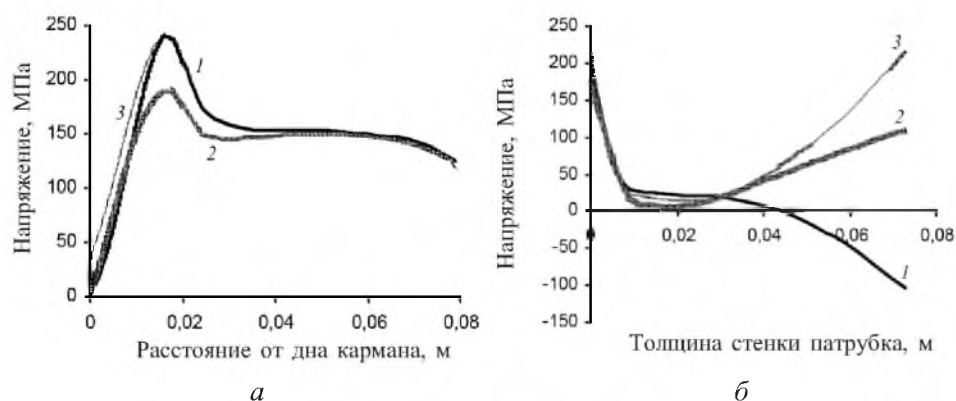


Рис. 4. Распределение осевых σ_z (1), окружных σ_φ (2) и эквивалентных $\sigma_1 - \sigma_3$ (3) остаточных напряжений на поверхности кармана со стороны патрубка (а) и по толщине его стенки (б), начиная от точки с максимальной напряженностью (по результатам двухмерных расчетов).

Такой же характер распределения остаточных напряжений на поверхности кармана в области галтельного перехода вследствие ТО следует из

расчетов НДС с использованием трехмерной модели парогенератора с узлом приварки. В результате расчетов дополнительно установлено распределение напряжений по окружной координате (рис. 5).

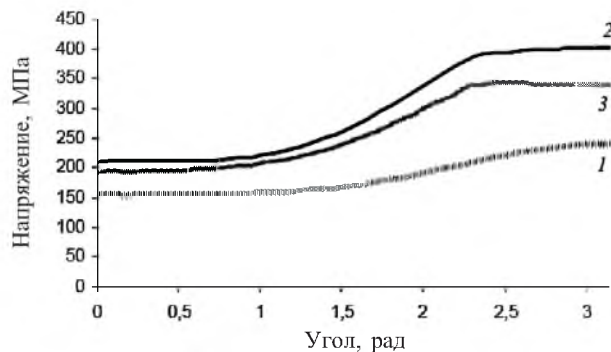


Рис. 5. Распределение окружных σ_φ (1), осевых σ_z (2) и главных σ_1 (3) остаточных напряжений, действующих на поверхности кармана со стороны патрубка на расстоянии 20 мм от его дна (по результатам трехмерных расчетов).

Согласно результатам визуальных осмотров поверхность дна кармана и области галтельного перехода характеризуются наличием большого числа дефектов: коррозионных язв, возникающих в результате действия среды теплоносителя, и отложений коррозионно-активных веществ (медь и др.) [6]. Формирующиеся вследствие ТО повышенные напряжения с учетом их концентрации в области дефектов могут быть причиной зарождения трещин. В случае возникновения трещин вследствие распределения компонент тензора напряжений по стенке патрубка ПГ (рис. 4,б) они могут распространяться в радиальном (наружу) и осевом (вдоль образующей патрубка) направлении.

Анализ результатов расчетов показал, что влияние прилегающих к сварному шву областей патрубка ПГ, препятствующих радиальному расширению области нагрева при ТО, является определяющим фактором в формировании поля остаточных растягивающих напряжений на поверхности кармана. Были выполнены расчеты НДС узла приварки после ТО, включающей дополнительный нагрев утолщенной части патрубка до температуры 480°C (рис. 1). Из расчетов следует, что благодаря дополнительному нагреву патрубка снижается влияние на НДС области шва. В качестве иллюстрации на рис. 6 (кривая 3) приведено расчетное распределение остаточных окружных напряжений на поверхности кармана после такой обработки. Результаты расчетов свидетельствуют о возможности существенного снижения уровня остаточных напряжений после ТО по оптимальным режимам.

Корректные расчеты НДС элементов конструкции при ТО требуют адекватного учета условий их теплообмена с окружающей средой. Для оценки чувствительности расчетной схемы к выбору условий теплообмена выполняли расчеты с измененными граничными условиями в области кармана: условия теплоизоляции заменяли конвективным теплообменом ($k = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$). Результаты, приведенные на рис. 5 (кривая 2), показывают, что граничные условия существенно влияют на расчетные оценки, что следует учитывать при анализе и использовании последних.



Рис. 6. Распределение остаточных окружных σ_φ напряжений на поверхности кармана со стороны патрубка (по результатам двумерных расчетов): 1 – “базовый” вариант ТО; 2 – вариант ТО с граничными условиями в виде конвекции в кармане; 3 – вариант ТО с дополнительным разогревом патрубка ПГ.

Заключение. В результате ТО после ремонта узла приварки коллектора к патрубка ПГ формируется остаточное НДС, которое характеризуется возникновением растягивающих напряжений значительной амплитуды в осевом и тангенциальном направлении на участках зоны ремонта.

Максимальные растягивающие напряжения формируются у дна кармана, в зоне галтельного перехода и являются результатом пластической деформации при высокотемпературной выдержке.

В случае возникновения трещины в максимально напряженной зоне узла приварки распределение остаточных напряжений по толщине стенки способствует ее дальнейшему распространению в плоскости, проходящей через ось патрубка ПГ.

Анализ результатов расчетов показал, что существенного снижения уровня остаточных напряжений, вызванных ТО, можно достичь дополнительным разогревом патрубка ПГ.

Задача дальнейших исследований состоит в поиске вариантов оптимальных режимов послеремонтной ТО, обеспечивающих снижение максимальной напряженности ремонтируемого узла.

Резюме

Представлено результати розрахункової оцінки напружено-деформованого стану вузла приварки колектора до корпусу парогенератора при термообробці, що використовується для зняття залишкових зварювальних напружень. Показано, що в результаті такої термообробки, що включає нагрівання, витримку та охолодження локальної області зі зварним швом, у вузлі формуються додаткові залишкові напруження значної величини.

1. Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М. Напряжения и деформации при сварке. – Киев: Вища шк., 1987. – С. 221 – 225.

2. *Зубченко А. С., Разыграев Н. П., Харина И. Л. и др.* Результаты исследований характера эксплуатационных повреждений металла в зонах сварных узлов коллекторов с патрубками Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000: Тр. VII Междунар. конф. “Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”. – СПб., 2002.
3. *Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др.* Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // Пробл. прочности. – 2003. – № 5. – С. 142 – 153.
4. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
5. *Сахаров А. С., Альтенбах И.* Метод конечных элементов в механике твердых тел. – Киев: Вища шк., 1982. – 478 с.
6. *Харина И. Л.* Результаты исследования влияния внешних факторов среды на стойкость против замедленного деформационного коррозионного растрескивания низколегированных сталей в воде высоких параметров: Тр. VI Междунар. конф. “Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС”. – СПб., 2000. – Т. 2. – С. 243 – 257.

Поступила 30. 03. 2006