

Оценка остаточных напряжений в узле соединения коллектора с патрубком парогенератора после дополнительной термомеханической обработки

Г. В. Степанов^а, В. В. Харченко^а, А. И. Бабуцкий^а, Н. Б. Трунов^б,
В. А. Пиминов^б

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

^б ОКБ “Гидропресс”, Подольск, Россия

Приведены результаты расчетной оценки возможности использования дополнительной термомеханической обработки узла приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 реакторных блоков ВВЭР-1000 АЭС с целью снижения уровня напряженности после ремонта и при последующей эксплуатации. Показана перспективность такой обработки для повышения долговечности узла.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, узел приварки, коллектор, парогенератор.

Введение. В результате термической обработки (ТО), проводимой с целью снятия остаточных сварочных напряжений после ремонта сварного шва № 111 узла приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000, в “кармане” узла у его дна вблизи галтельного перехода возникает высокий уровень остаточных напряжений [1, 2]. Суммирование последних с напряжениями, вызванными эксплуатационными нагрузками, формирует поле высоких растягивающих напряжений, близких к пределу текучести, которые ускоряют развитие повреждений в узле приварки. В связи с этим их снижение является актуальной задачей, решение которой позволит повысить длительность безопасной эксплуатации парогенератора (ПГ).

Снизить остаточные растягивающие напряжения, вызванные ТО отремонтированного патрубка, можно путем его дополнительной термомеханической обработки (ТМО), вследствие чего в области галтельного перехода в кармане узла приварки возникают напряжения сжатия. Исходя из общих соображений создание остаточных сжимающих напряжений в этой области возможно при ТМО, когда на стадии приложения нагрузки будут возникать локальные неупругие деформации растяжения, что при разгрузке приведет к формированию поля сжимающих напряжений. Такая обработка может быть эффективной технологической операцией на стадии монтажа ПГ, его ремонта и эксплуатации, что обеспечивает повышение срока безопасной эксплуатации.

Основные особенности влияния ТМО на напряженно-деформированное состояние (НДС) узла и возможности ее использования проиллюстрированы на примере расчетов одного из вариантов обработки с использованием осесимметричной модели узла. Такая упрощенная модель выбрана для оценки принципиальной возможности ТМО.

Полученные результаты, подтверждающие перспективность применения такого рода ТМО, требуют дальнейшей проверки и уточнения путем модели-

рования различных условий ее проведения и последующего эксплуатационного нагружения с использованием трехмерной модели узла приварки.

Схема нагружения при выполнении ТМО. Расчет осесимметричного НДС в области узла приварки с учетом упругопластического поведения металла при заданном изменении температуры в локальной области с учетом теплопроводности и конвективного теплообмена выполнен с помощью метода конечных элементов. Для расчетной оценки основных особенностей кинетики НДС использовали упрощенную модель узла, состоящую из коллектора, соединенного через патрубок со сферическим корпусом. Учитывая симметрию геометрии и нагружения узла, рассматривали модель в виде половины его сечения (рис. 1). Напряженно-деформированное состояние рассчитывали для нулевых начальных условий и при отсутствии ограничений на перемещение торцов коллектора.

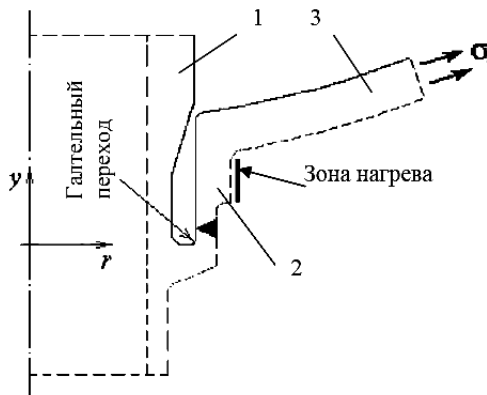


Рис. 1. Расчетная модель узла сварного соединения коллектора (1) с патрубком (2) парогенератора (3) при ТМО.

Рассмотренный вариант ТМО включает нагружение корпуса ПГ давлением $p = 6$ МПа (первый этап), местный нагрев утолщенной части патрубка (второй этап), последующее охлаждение при сохранении давления (третий этап) и снижение давления (четвертый этап). Термическая нагрузка (местный нагрев): повышение температуры нагреваемой поверхности узла (рис. 1) до 500°C за время $t = 1000$ с; последующее медленное охлаждение вследствие конвективного теплообмена. Остальные поверхности узла участвуют в конвективном теплообмене с окружающей средой, температура которой принята равной нулю, коэффициент конвективного теплообмена $\eta = 20$ Вт/(м² · К).

Неупругое деформирование материала в процессе обработки определяли с использованием уравнения изотропного деформационного упрочнения с учетом влияния температуры в виде [1–3]

$$\sigma = \sigma_Y^0(1 + \varepsilon) \left(1 - \frac{\Delta T}{T^*}\right),$$

где σ_Y^0 – предел текучести при нулевой температуре; ΔT – температура нагрева; T^* – параметр материала.

В расчетах принимали, что модуль Юнга E изменяется от 200 ГПа при нулевой температуре до 150 ГПа при $T = 750^\circ\text{C}$. Коэффициенты Пуассона $\nu = 0,3$ и линейного расширения $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а также значения теплоемкости $C_V = 3,2 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$ и теплопроводности $\eta = 80 \text{ Дж/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{К)}$ металла приняты постоянными. Параметры использованного уравнения неупругого деформирования ($\sigma_Y^0 = 350 \text{ МПа}$, $T^* = 940^\circ\text{C}$) обеспечивают учет снижения предела текучести до 165 МПа при повышении температуры до $T = 500^\circ\text{C}$.

Внутренняя поверхность корпуса ПГ и наружная поверхность коллектора, расположенного в нем, нагружены давлением второго контура p . Действие удаленной части корпуса ПГ моделируется напряжением в его стенке $\sigma_t = 0,5(R/s)p$ (s и R – толщина стенки сферической оболочки, моделирующей корпус ПГ, и ее радиус соответственно). Для учета влияния на НДС различной кривизны реального корпуса ПГ в осевом и окружном направлении в области его соединения с патрубком радиус сферической оболочки принят равным удвоенному радиусу корпуса ($R = 4 \text{ м}$).

Граничное условие (опора по кромке участка сферической оболочки) ограничивает перемещение оболочки в вертикальном направлении, не влияя на ее горизонтальное перемещение.

Результаты расчетов и их анализ. Расчетные данные приведены для области в окрестности галтельного перехода в кармане узла приварки (рис. 1). По результатам расчетов напряженное состояние узла при давлении 6,0 МПа во втором контуре (нагружение на первом этапе ТМО) характеризуется наличием значительного уровня растягивающих осевого и главного напряжений, достигающих на патрубке в области галтельного перехода в кармане узла величины 150 МПа.

На втором этапе ТМО (линейный нагрев кольцевой поверхности патрубка до 500°C за 1000 с) максимальная температура на поверхности кармана повышается всего до 120°C , напряжения в области галтели достигают предела текучести. На рис. 2 приведено распределение напряжений по образующей кармана от его дна. Как следует из результатов расчетов, указанное термомеханическое нагружение вызывает пластическое течение (растяжение) в области галтели у дна кармана.

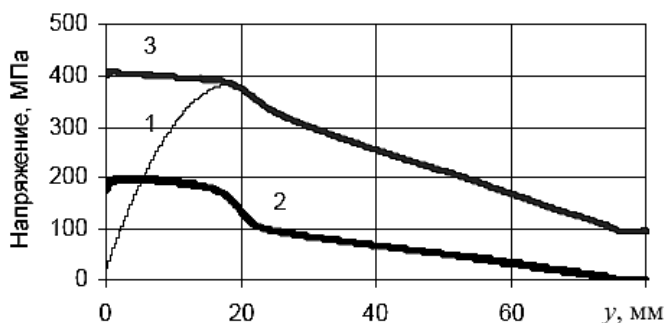


Рис. 2. Распределение напряжений вдоль образующей кармана после второго этапа ТМО (нагрев кольцевой области до 500°C при давлении 6,0 МПа во втором контуре). (Здесь и на рис. 3, 5: 1, 2, 3 – осевое, окружное и первое главное напряжения соответственно.)

На третьем этапе ТМО (охлаждение при сохранении давления в корпусе ПГ) в области пластического течения, возникшего на втором этапе, появляется поле сжимающих напряжений (рис. 3).

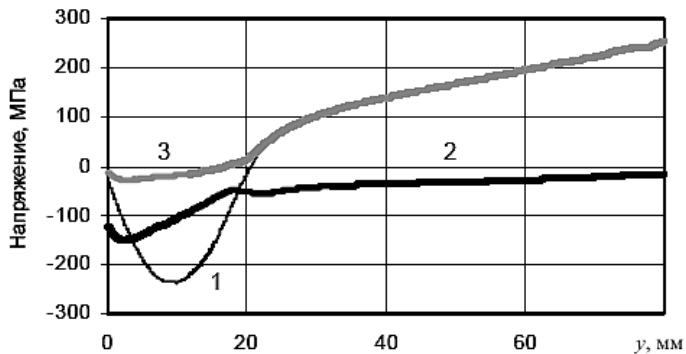


Рис. 3. Распределение напряжений по образующей кармана после третьего этапа ТМО.

Согласно результатам расчетов ТМО приводит к снижению растягивающих напряжений в области галтельного перехода (рис. 4). Причем, как следует из распределения напряжений по образующей кармана, после использованного режима ТМО в этой области создается поле сжимающих напряжений по всем направлениям. На рис. 5 показано поле остаточных напряжений после полной разгрузки (снижение давления в корпусе ПГ) на заключительном этапе ТМО.

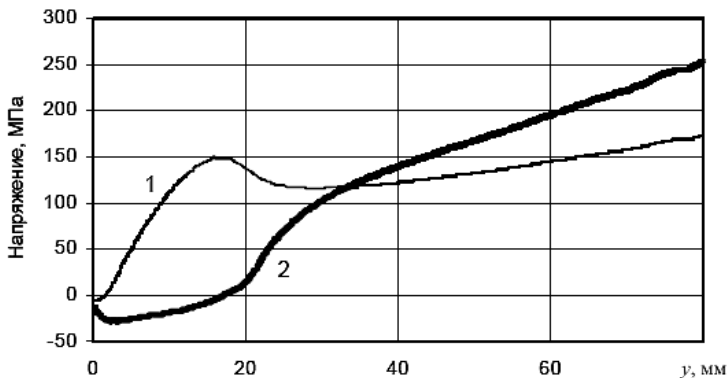


Рис. 4. Распределение первого главного напряжения по образующей кармана при давлении 6,0 МПа во втором контуре после первого (1) и третьего (2) этапов ТМО.

Отметим, что и формирование напряжений сжатия при ТМО связано с развитием пластической деформации, которая возникает в области галтельного перехода в кармане (рис. 6). Нагружение давлением (на первом этапе ТМО) не вызывает деформаций, а последующие нагрев и охлаждение (на втором и третьем этапах ТМО) приводят к развитию соответственно деформаций сжатия и растяжения у дна кармана. При последующем нагружении давлением 6,0 МПа узла, ранее подвергнутого предложенной ТМО, распределение окружающих напряжений в кармане у его дна практически не отлича-

ется от распределения напряжений после третьего этапа ТМО. Следовательно, ТМО при выбранных параметрах позволяет сохранить упругое деформирование металла в области кармана при последующих нагружениях ПГ давлением 6,0 МПа во втором контуре, что препятствует накоплению поврежденности металла узла.

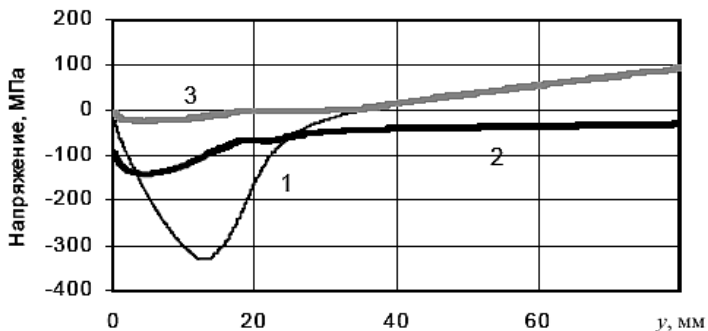


Рис. 5. Распределение напряжений по образующей кармана после четвертого этапа ТМО.

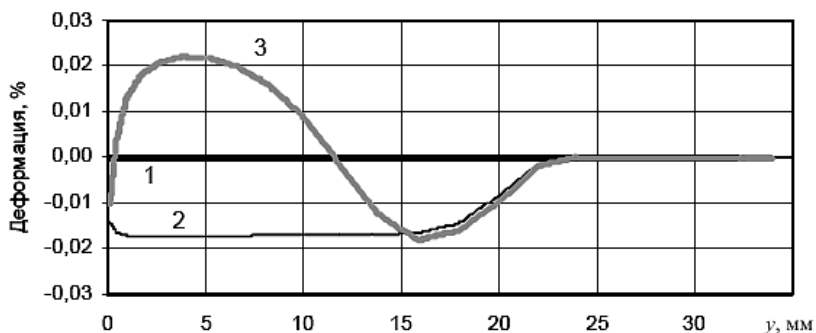


Рис. 6. Распределение пластической деформации по образующей кармана после первого (1), второго (2) и третьего (3) этапов ТМО.

Уровень напряжений сжатия и их распределение в области кармана существенно изменяются в зависимости от параметров ТМО (выбор места нагрева, температура, скорость нагрева, давление и условия теплоотвода). По результатам проведенных оценок использование ТМО с оптимальными параметрами нагружения представляется перспективным технологическим процессом, обеспечивающим создание в узле парогенератора НДС, оптимального с точки зрения продления ресурса его безопасной эксплуатации.

Выводы

1. Термомеханическая обработка узла приварки, включающая нагрев утолщенной части патрубка при достаточном давлении в корпусе ПГ после остывания и снижения давления, создает в кармане в области галтельного перехода поле остаточных сжимающих напряжений.

2. Последующее после ТМО нагружение второго контура ПГ давлением 6,0 МПа приводит к упругому деформированию металла в области кармана.

3. Величина остаточных сжимающих напряжений и их распределение зависят от режима ТМО, выбора области нагрева, давления и температуры в корпусе ПГ.

4. Для решения вопроса о применении ТМО необходима уточненная оценка величины и распределения остаточных сжимающих напряжений, выполненная с использованием трехмерной модели узла соединения коллектора с корпусом ПГ.

Резюме

Наведено результати розрахункової оцінки можливості використання додаткової термомеханічної обробки вузла приварки колектора до патрубку парогенератора ПГВ-1000 реакторних блоків ВВЕР-1000 АЕС з метою зменшення рівня напруженості після ремонту і наступної експлуатації. Показано перспективність такої обробки для підвищення довговічності вузла.

1. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку парогенератора при локальной термообработке // Пробл. прочности. – 2006. – № 6. – С. 43 – 50.
2. Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др. Особенности НДС узла приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000 АЭС при эксплуатации и ремонте: Сб. научных статей целевой программы НАН Украины “Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций сооружений и маши”. – Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2006. – С. 181 – 184.
3. Степанов Г., Бабуцкий А. Вплив локального осесиметричного нагрівання труби на рівень залишкових напружень // Вісн. Тернопіль. держ. техн. ун-ту. – 2004. – 9, № 4. – С. 32 – 36.

Поступила 24. 06. 2008