

## Перераспределение напряжений в узле соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при его нагружении после термообработки

В. В. Харченко<sup>а</sup>, Г. В. Степанов<sup>а</sup>, В. И. Кравченко<sup>а</sup>, С. В. Кобельский<sup>а</sup>,  
А. И. Бабуцкий<sup>а</sup>, Н. Б. Трунов<sup>б</sup>, В. А. Пиминов<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> ФГУП ОКБ “Гидропресс”, Подольск, Россия

*Дополнительный нагрев утолщенной части патрубка парогенератора при послеремонтной термообработке узла приварки коллектора к патрубку приводит к снижению уровня остаточных растягивающих напряжений. Показано, что при проведении гидроиспытаний, выполняемых после термообработки, происходит уменьшение неупругих деформаций на внутренней поверхности патрубка, что повышает циклическую долговечность узла.*

**Ключевые слова:** коллектор, парогенератор, термообработка, гидроиспытания.

**Введение.** Для снятия нежелательных остаточных напряжений, возникших вследствие сварки, при проведении ремонтно-восстановительных работ узла соединения коллектора с корпусом парогенератора ПГВ-1000 реактора ВВЭР-1000 используется термообработка (ТО), включающая нагрев, выдержку при повышенной температуре для релаксации остаточных сварочных напряжений и последующее охлаждение. Проблема возникновения остаточных напряжений (ОН) при термообработке узла соединения коллектора с корпусом парогенератора (ПГ) не изучена в полной мере, что определяет актуальность исследований в этом направлении.

На основании полученных ранее [1] результатов по оптимизации выполнения ТО узла приварки коллектора к патрубку ПГ после ремонта предложены ее режимы, обеспечивающие снижение максимальных ОН в узле. В этих расчетах учитывается влияние изгибающего момента на узел приварки со стороны главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) без учета жесткости его соединения с корпусом реактора (КР) и перераспределения напряжений в узле при последующем нагружении.

В данном сообщении приведены результаты уточненного расчета кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) в узле приварки коллектора к патрубку ПГ при моделировании операции термообработки и последующего эксплуатационного нагружения, включающего гидроиспытания (ГИ) и последующие нормальные условия эксплуатации (НУЭ).

**Выбор расчетной схемы.** Кинематические связи элементов реакторов “малой” и “большой” серий (ПГ, горячей ветви ГЦТ и КР) аналогичны и отличаются только компоновкой. На рис. 1 приведена расчетная модель ПГ малой серии. Схема нагружения учитывает опирание ПГ и КР на катки и опорный бурт соответственно, а также жесткое защемление торца ГЦТ в стенке КР. На рис. 2 показана конструкция узла сварного соединения, наибо-

лее нагруженным элементом которого является утоненная часть патрубка ПГ, включающая сварной шов. На эту часть патрубка действуют нагрузки на ПГ со стороны ГЦТ, вес присоединенных к коллектору конструктивных элементов и теплоносителя, а также нагрузки, вызванные давлением в первом и втором контурах ПГ.

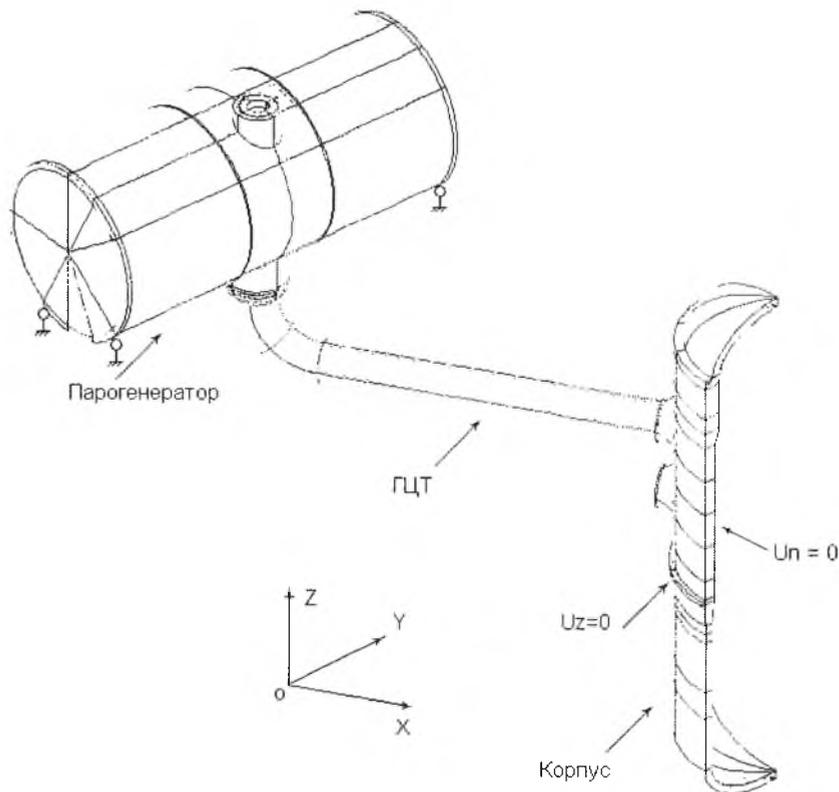


Рис. 1. Расчетная модель реактора, включающая парогенератор, ГЦТ и корпус реактора.

Расчеты проводили с использованием программы SPACE [2], позволяющей решать задачу термопластичности в пространственной постановке с учетом истории нагружения.

Принимаем, что физико-механические свойства металла ПГ зависят от температуры. Неупругое деформирование материала в процессе релаксации к концу периода выдержки рассчитывали по уравнению изотропного деформационного упрочнения с учетом влияния температуры [3]

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

где  $\sigma_Y$  – предел текучести при температуре 20°C;  $\Delta T$  – температура нагрева;  $T^*$  – параметр материала. Параметры данного уравнения определяют линейное снижение напряжений в результате релаксации при заданной выдержке с  $\sigma_Y = 340$  МПа (при  $T = 20^\circ\text{C}$ ) до  $\sigma_Y = 100$  МПа (при  $T = 650^\circ\text{C}$ ).

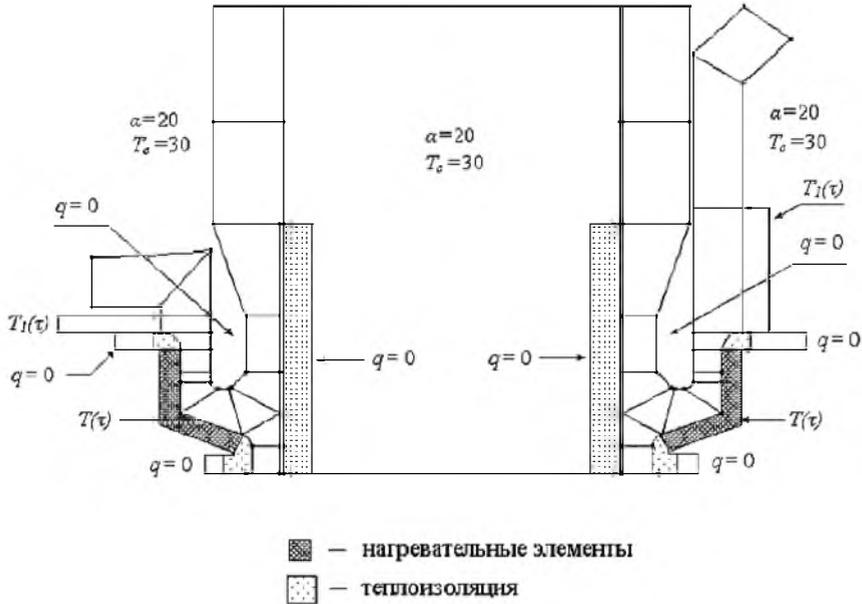


Рис. 2. Схема нагрева при ТО-опт.

Расчет кинетики НДС в узле приварки при термообработке выполнен для ее оптимального режима (ТО-опт) на основании результатов проведенного ранее [1] моделирования, он предусматривает нагрев утоненной части патрубка и половины поверхности его утолщенной части (рис. 2). Такая термообработка позволяет понизить уровень максимальных ОН в области галтельного перехода узла приварки коллектора к патрубку ПГ.

В расчетах принято изменение температуры (нагрев с 20 до 650°C за 9 ч; выдержка при постоянной температуре в течение 7 ч; охлаждение до 20°C за 11 ч), соответствующее ТО-опт.

При определении НДС решали нестационарную задачу теплопроводности с учетом зависимости теплофизических свойств от температуры. При заданном времени от начала нагружения определяли температурные поля, которые использовали далее при решении задачи термопластичности.

Для уменьшения трудоемкости расчетов предложена редуцированная расчетная модель, в которой узел соединения ГЦТ с корпусом реактора заменен жестким заземлением ГЦТ. Значения остаточных окружных  $\sigma_\varphi$ , осевых  $\sigma_z$  и эквивалентных  $\sigma_i$  напряжений на стенке “кармана” в области галтельного перехода узла приварки, полученные с использованием полной, включающей ПГ, ПЦТ и КР, и редуцированной расчетной моделей отличаются несущественно (менее 1%). Поэтому далее в расчетах ТО-опт, последующих ГИ и НУЭ использовали редуцированную модель как более экономичную.

**Результаты расчетов перераспределения ОН в узле приварки при первых ГИ и НУЭ после ТО.** При моделировании гидроиспытаний ПГ нагружали давлением 25 МПа в первом контуре и 11 МПа во втором контуре. При моделировании НУЭ давление составляло 16 и 6 МПа соответственно.

Ниже приведены результаты расчета интенсивности ОН в узле приварки коллектора к патрубку ПГ большой серии после ТО-опт, их перераспределение после первых ГИ и НУЭ.

На рис. 3 показано распределение интенсивности ОН по стенке кармана вдоль угловой координаты на расстоянии 20 мм от его дна после ТО-опт, ГИ и НУЭ. Видно существенно неравномерное распределение интенсивности ОН. Наибольших значений они достигают вблизи областей, прилегающих к короткой и длинной частям патрубка, на всех этапах цикла нагружения.

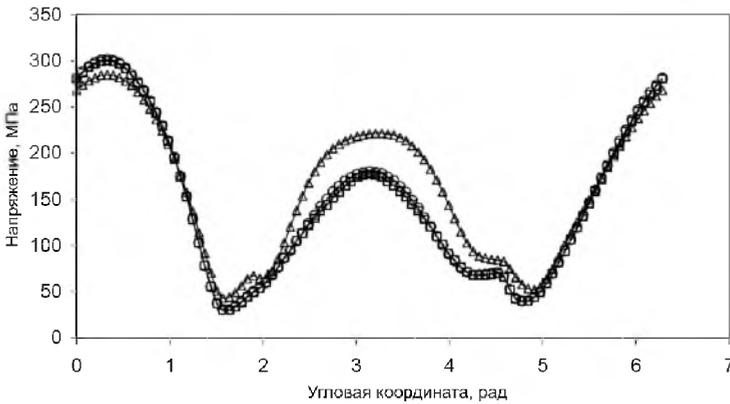


Рис. 3. Распределение интенсивности ОН по стенке кармана вдоль угловой координаты на расстоянии 20 мм от его дна после ТО-опт, ГИ и НУЭ. Здесь и на рис. 4, 5:  $\Delta$  —  $\sigma_i$  после ТО-опт;  $\circ$  —  $\sigma_i$  после ГИ;  $\square$  —  $\sigma_i$  после НУЭ.

Графики изменения интенсивности ОН после ТО-опт, их перераспределение после первых ГИ и НУЭ для короткой и длинной частей патрубка в меридиональных сечениях, соответствующих углам  $\varphi = \pi$  и  $\varphi = 0$  соответственно, приведены на рис. 4 и 5.

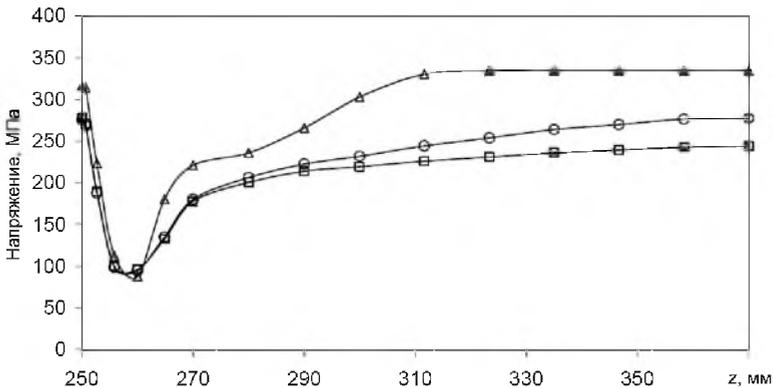


Рис. 4. Распределение интенсивности ОН по стенке кармана в области галтельного перехода ПГ большой серии после ТО-опт, ГИ и НУЭ ( $\varphi = \pi$ ; при  $z = 250$  мм у дна кармана).

Максимальные значения компонентов ОН после ТО-опт, ГИ и НУЭ в области галтельного перехода ( $z = 250 \dots 270$  мм) для короткой и длинной частей патрубка приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Т а б л и ц а 1

## Остаточные напряжения в короткой части патрубка

Напряжение, МПа	После ТО-опт	После ГИ	После НУЭ
$\sigma_\varphi$	150	171	172
	150	171	172
$\sigma_z$	223	180	173
	223	180	173
$\sigma_i$	221	180	176
	316	276	278

**Примечание.** Здесь и в табл. 2: над чертой приведены значения напряжений на стенке кармана (20 мм от его дна), под чертой – максимальные (по абсолютной величине) в области галтельного перехода.

Т а б л и ц а 2

## Остаточные напряжения в длинной части патрубка

Напряжение, МПа	После ТО-опт	После ГИ	После НУЭ
$\sigma_\varphi$	172	14	14
	14	208	208
$\sigma_z$	-56	-68	-66
	-182	-192	-192
$\sigma_i$	67	76	74
	335	332	335

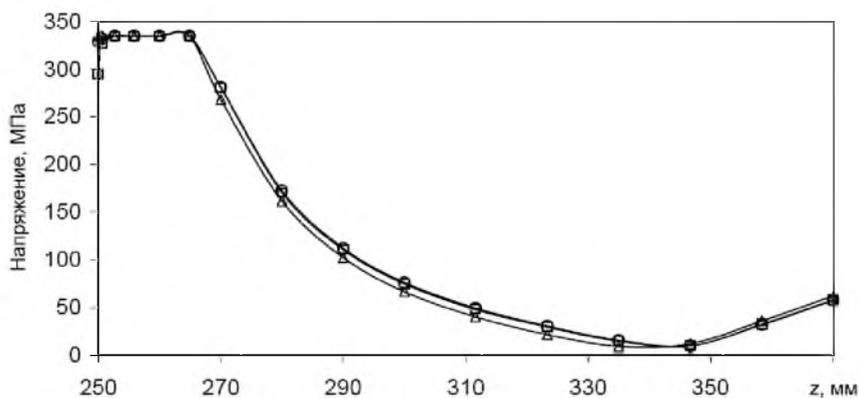


Рис. 5. Распределение интенсивности ОН на стенке кармана в области галтельного перехода ПГ большой серии после ТО-опт, ГИ и НУЭ ( $\varphi = 0$ ; при  $z = 250$  мм у дна кармана).

На рис. 6 показано изменение интенсивности пластической деформации по стенке кармана в области галтельного перехода после ТО-опт, ГИ и НУЭ ( $\varphi = \pi$  и  $\varphi = 0$  для короткой и длинной частей патрубка соответственно).

По результатам проведенных расчетов нагружение при НУЭ после ГИ не вызывает существенного изменения интенсивности ОН и интенсивности пластической деформации по поверхности кармана (вдоль оси коллектора и по окружной координате), за исключением узкой области вблизи короткой части

патрубка. Можно предположить, что при последующих ГИ и НУЭ происходит перераспределение ОН, в результате чего уровень неупругих деформаций за цикл нагружения снижается.

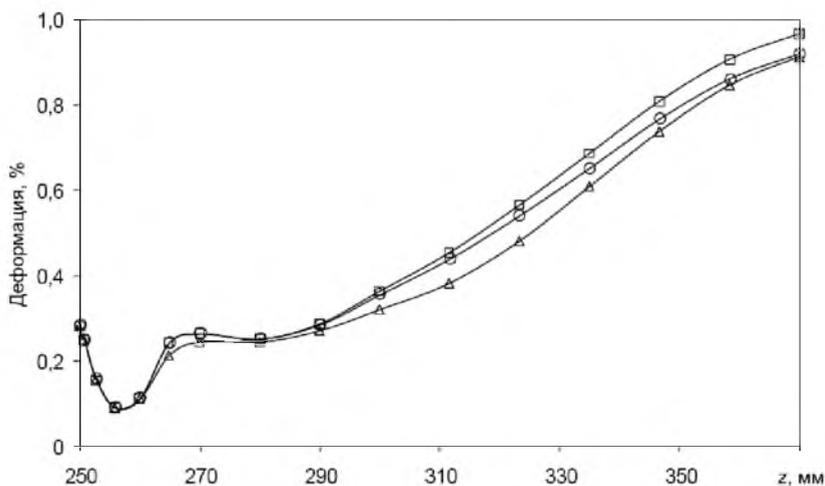


Рис. 6. Распределение интенсивности пластической деформации на стенке кармана в области галтельного перехода ПГ большой серии после ТО-опт, ГИ и НУЭ ( $\varphi = \pi$ ; при  $z = 250$  мм у дна кармана):  $\triangle$  –  $\varepsilon_{ip}$  после ТО-опт;  $\circ$  –  $\varepsilon_{ip}$  после ГИ;  $\square$  –  $\varepsilon_{ip}$  после НУЭ.

Интенсивность пластической деформации на стенке кармана в области галтельного перехода при  $\varphi = 0$  после ТО-опт не изменяется при ГИ и НУЭ.

## Выводы

1. Показана применимость редуцированной расчетной модели (с жестким защемлением торца трубы ГЦТ со стороны КР), учитывающей влияние изгибающего момента со стороны ГЦТ на узел приварки и обеспечивающей уточненную оценку НДС при ТО.

2. Дополнительный нагрев утолщенной части патрубка при термообработке снижает уровень максимальных растягивающих ОН в узле приварки. Проведение ГИ после такой ТО приводит к уменьшению величины неупругой деформации и, как следствие, к увеличению числа циклов до разрушения, определяемого истощением ресурса пластичности металла.

3. Нагружение при НУЭ после ГИ не вызывает возникновения неупругих деформаций на поверхности кармана, за исключением локальных зон в области галтельного перехода. Изменение интенсивности неупругой деформации в этих зонах за первый цикл нагружения при НУЭ не превышает 0,03% и сопровождается снижением интенсивности ОН.

4. Можно предположить, что перераспределение ОН при последующих циклах нагружения приведет к уменьшению накопления неупругих деформаций за цикл нагружения при НУЭ, что будет благоприятно влиять на длительность безопасной эксплуатации ПГ. Расчетная оценка такого эффекта является задачей дальнейших исследований.

## Резюме

Додаткове нагрівання стовщеної частини патрубку парогенератора при після-ремонтної термообробки вузла приварки колектора до патрубка призводить до зменшення рівня залишкових напружень розтягу. Показано, що при гідровипробуваннях, які проводяться після термообробки, зменшується величина непружної деформації на внутрішній поверхні патрубка, що збільшує циклічну довговічність вузла.

1. *Степанов Г. В., Харченко В. В., Бабуцкий А. И. и др.* Напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку корпуса парогенератора при локальной термообработке // Пробл. прочности. – 2006. – № 6. – С. 43 – 50.
2. *Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)”* // Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0084261-02. – 2002.
3. *Степанов Г., Бабуцкий А.* Вплив локального осесиметричного нагрівання труби на рівень залишкових напружень // Вісн. Тернопільського держ. техн. ун-ту. – 2004. – 9, № 4. – С. 32 – 36.

Поступила 24. 06. 2008