

УДК 621.039: 539.421.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПЛАВКИ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ НА РАСКРЫТИЕ ТРЕЩИНЫ В ТРУБОПРОВОДЕ Ду800 ИЗ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

Д. А. Кузьмин  
(АО "ВНИИАЭС", г. Москва)

Объектом исследования является прямолинейный участок главного циркуляционного трубопровода из перлитной стали, плакированный наплавкой из аустенитной стали. Указанные типы стали имеют разные коэффициенты линейного расширения. Исследовано влияние наплавки на раскрытие сквозной трещины в трубопроводе. Определены величины раскрытия трещин и форма их берегов при различных длинах трещин. Проведен сравнительный анализ площади раскрытия трещины для трубопровода, плакированного наплавкой, и без наплавки.

*Ключевые слова:* главный циркуляционный трубопровод, аустенитная наплавка, раскрытие трещины.

### Введение

Концепция *течь перед разрушением* (ТПР) — это концепция конструирования сосудов давления, которая предполагает, что полному разрушению сосуда предшествует течь через относительно устойчивую трещину. Обзор теории и практики применения концепции ТПР дан в работе [1]. Для применения концепции ТПР требуется правильно оценивать раскрытие трещины и ее размеры. Критический размер трещины — размер, достижение и превышение которого приводит к быстрому, неуправляемому и окончательному разрушению конструкции.

В реакторостроении получили распространение трубопроводы из углеродистых и углеродистых малолегированных сталей с антикоррозионной наплавкой из стали аустенитного класса. Указанные типы стали имеют разные коэффициенты линейного расширения, что при нагреве приводит к возникновению больших сжимающих напряжений в наплавке. Большие сжимающие напряжения в наплавке могут препятствовать раскрытию сквозных трещин в трубопроводе и истечению теплоносителя из него.

Этот эффект до сих пор не учитывается существующими нормативными документами, регулирующими применение концепции ТПР на АЭС, ни в России [2], ни за рубежом, в частно-

сти в США [3] и Германии [4]. При этом наличие антикоррозионной наплавки учитывается только прибавлением ее толщины к толщине основного металла. При определении площади раскрытия трещины и расхода теплоносителя толщина стенки расчетного компонента определяется с учетом толщины слоя наплавки.

В данной статье исследовано влияние разницы коэффициентов температурного расширения основного металла из перлитной стали и наплавки из нержавеющей аустенитной стали на возможность обеспечения безопасности эксплуатации главных циркуляционных трубопроводов (ГЦТ) АЭС.

### Постановка задачи и расчеты

ГЦТ на АЭС типа РБМК-1000 имеет внутренний диаметр 800 мм, толщину 51 мм (рис. 1), где в качестве основного металла (1) используется сталь 22К толщиной 44 мм, а антикоррозионная наплавка (2) толщиной 7 мм выполнена из стали 08Х18Н10Т.

Механические свойства указанных металлов при температуре 270 °С следующие:

— для стали 22К

$$E = 183 \text{ ГПа}; \quad \alpha = 12,9 \text{ мкК}^{-1};$$

$$R_{p0,2} = 186 \text{ МПа}; \quad R_m = 417,4 \text{ МПа};$$

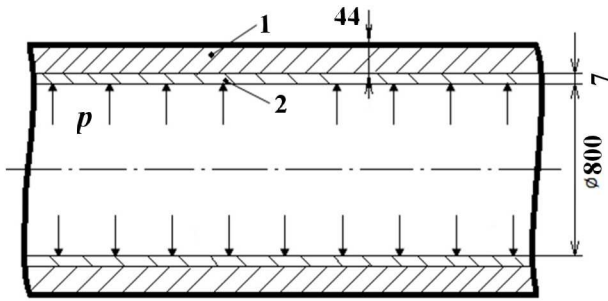


Рис. 1. Элемент трубопровода Ду800: 1 — сталь 22К; 2 — сталь 08X18H10T

— для стали 08X18H10T

$$E = 183 \text{ ГПа}; \quad \alpha = 17,3 \text{ мкК}^{-1};$$

$$R_{p0,2} = 183 \text{ МПа}; \quad R_m = 417,4 \text{ МПа}.$$

Здесь  $E$  — модуль упругости (модуль Юнга);  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  $R_{p0,2}$  — предел текучести;  $R_m$  — предел прочности.

Наплавка находится в сжатом состоянии, тем самым растягивает основной металл в месте наплавления, что существенно сказывается на раскрытии трещин.

Нормальные условия эксплуатации данного трубопровода — внутреннее давление 7,1 МПа и температура теплоносителя 270 °С. Распределение температуры по толщине стенки трубопровода считаем постоянным. В действительности изменение температуры по толщине стенки присутствует, но оно незначительно и не превышает нескольких градусов, так как трубопровод теплоизолирован. Если учесть неравномерность распределения температуры по толщине стенки, возникнут дополнительные термические напряжения, которые, в свою очередь, приведут к дополнительному закрытию трещины. В настоящей работе данный эффект не рассматривается, чтобы показать влияние наплавки.

Прямолинейный участок трубопровода со сквозной трещиной рассчитан в программном комплексе ANSYS 14 (лицензия № 662207 от 21.03.2012). Построена модель прямолинейного участка трубопровода длиной 415, 2415 и 4415 мм, толщиной 51 мм (в том числе толщина основного металла 44 мм, наплавки — 7 мм) с трещиной. Расчетная область разбита на конечные элементы типа *20node95*. Общий вид конечно-элементной сетки 1/8 части трубопровода показан на рис. 2.

На рис. 3 (см. также цветную вкладку) показана часть модели трубопровода с внутренней стороны в области трещины со сгущением сетки к фронту трещины. Представленная трещина имеет длину  $l$  (по внутренней поверхности трубопровода), в цилиндрических координатах этой длине соответствует угол  $2\varphi$ . Красным и оранжевым цветом обозначены соответственно линии берега и фронта трещины. Длина берега трещины, показанного на рисунке, соответствует полудлине трещины  $c$  ( $l = 2c$ ).

При данной постановке задачи интересны раскрытие и форма берега трещины как с учетом, так и без учета влияния наплавки при различных длинах трещины.

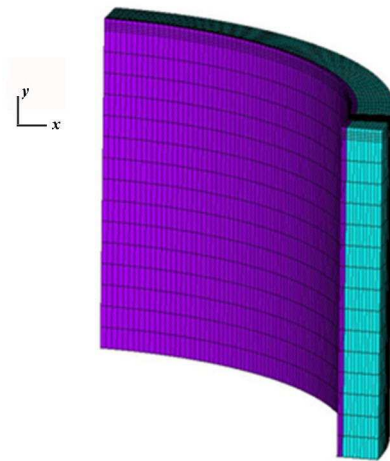


Рис. 2. Общий вид конечно-элементной сетки части трубопровода

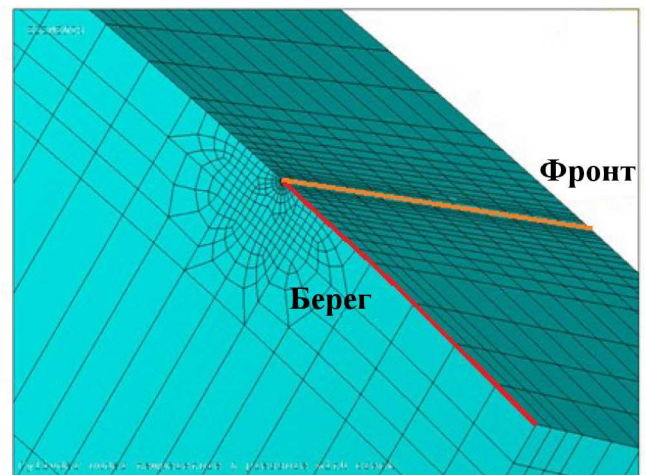


Рис. 3. Конечно-элементная сетка в области трещины

### Результаты расчетов

В программном комплексе ANSYS проведены расчеты для заложенных кольцевых трещин при  $2\varphi = 36; 54; 72; 108^\circ$ . На рис. 4–7 показаны функции раскрытия трещин от их протяженности  $d$  (удаленности от точки 0, принадлежащей фронту трещины). Положительные значения раскрытия трещин на рис. 4, *a*, 5, *a* и 6, *a* (пунктирные линии) — это мнимые значения, обусловленные применением комплекса ANSYS без учета контакта. На самом деле они характеризуют отсутствие раскрытия трещины.

На рис. 4, *a* показано, что при  $2\varphi = 36^\circ$  при наличии наплавки раскрытия трещины нет, площадь раскрытия равна нулю. Наплавка закрывает

трещину, что препятствует истечению теплоносителя. При отсутствии наплавки (рис. 4, *б*) трещина беспрепятственно раскрывается, вид функции раскрытия трещины — эллиптический. Аналогичные результаты получены для трещины при  $2\varphi = 54^\circ$  (рис. 5).

Оценим влияние наплавки на раскрытие трещины при  $2\varphi = 72^\circ$  (рис. 6) в предположении, что форма раскрытия трещины представляет собой эллипс. Согласно рис. 6, *a* это эллипс с малой полуосью  $3,573 \cdot 10^{-5}$  м; на рис. 6, *б* — эллипс с малой полуосью  $1,069 \cdot 10^{-4}$  м. Без наплавки (см. рис. 6, *б*) большая полуось эллипса равна 0,251 м. В случае с наплавкой (см. рис. 6, *a*) она составляет 0,251 м за вычетом значения,

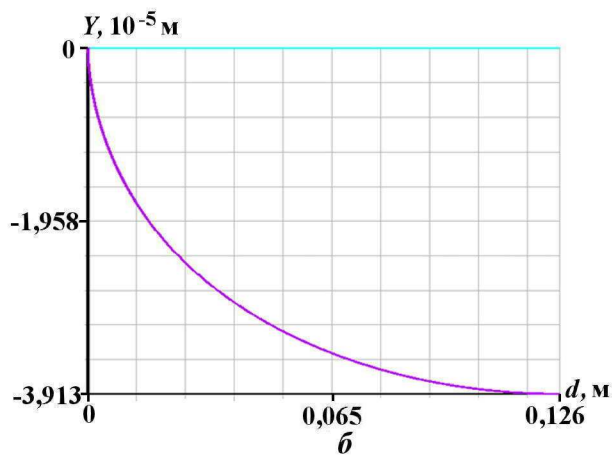
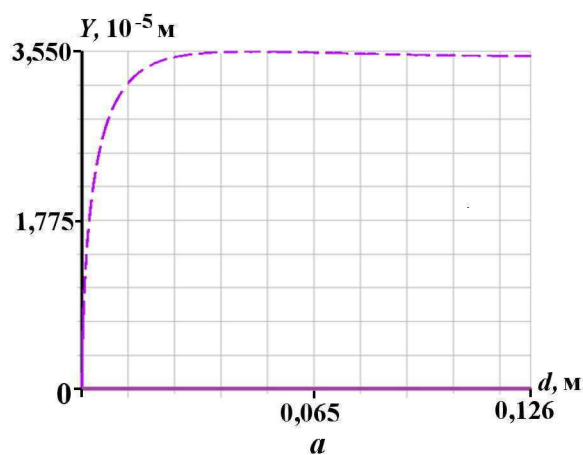


Рис. 4. Раскрытие трещины в зависимости от ее протяженности при  $2\varphi = 36^\circ$ : *a* — с учетом наплавки; *б* — без учета наплавки

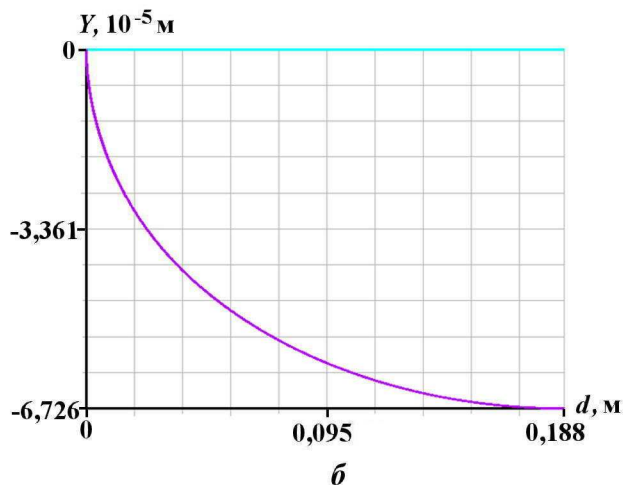
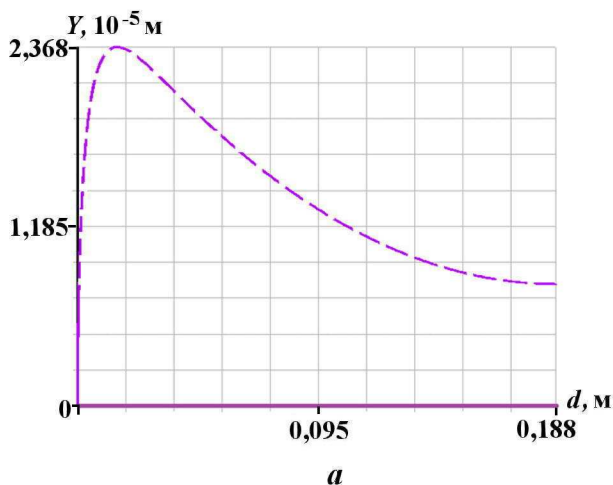


Рис. 5. Раскрытие трещины в зависимости от ее протяженности при  $2\varphi = 54^\circ$ : *a* — с учетом наплавки; *б* — без учета наплавки

соответствующего отсутствию раскрытия трещины и равного 0,045 м. Влияние наплавки на раскрытие трещины рассчитывается следующим образом:

$$\frac{S_{\text{без } T}}{S_{cT}} = \frac{1,069 \cdot 10^{-4} \cdot 0,251\pi \text{ м}^2}{3,573 \cdot 10^{-5} \pi (0,251 - 0,045) \text{ м}^2} = 3,64,$$

где  $S_{\text{без } T}$  и  $S_{cT}$  — площади раскрытия трещины без наплавки и с наплавкой.

Таким образом, за счет термических напряжений наплавки площадь раскрытия трещины при  $2\varphi = 72^\circ$  уменьшается примерно в 3,64 раза, т. е. на 72,5 %

Влияние наплавки на раскрытие трещины при  $2\varphi = 108^\circ$  (рис. 7) оценим аналогичным образом. Малая полуось эллипса на рис. 7, а равна  $1,668 \cdot 10^{-4}$  м, а на рис. 7, б —  $2,277 \cdot 10^{-4}$  м,

их отношение составляет 1,37. Это означает (поскольку большие полуоси обоих эллипсов равны) уменьшение площади раскрытия трещины примерно на 27 %.

Исходя из полученных выше результатов, демонстрирующих тенденцию влияния наплавки на раскрытие трещины, построена зависимость максимальных раскрытий трещин ( $v_{\text{max}}$ ) от длин трещин по окружности, переведенных в градусы ( $2\varphi$ ), для трубопроводов с наплавкой и без нее (рис. 8, см. также цветную вкладку). Из рисунка видно (кривая 1), что для трубопроводов с наплавкой трещины с длинами в диапазоне угла  $2\varphi = 0^\circ \div 60^\circ$  закрываются (область отрицательных значений функции), а при  $2\varphi = 60^\circ \div 108^\circ$  — раскрываются (область положительных значений функции).

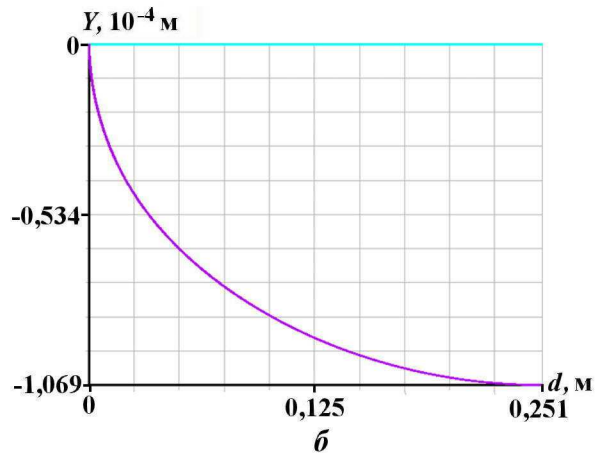
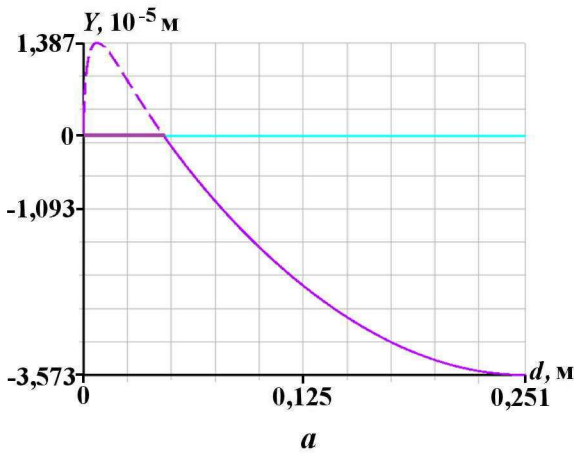


Рис. 6. Раскрытие трещины в зависимости от ее протяженности при  $2\varphi = 72^\circ$ : а — с учетом наплавки; б — без учета наплавки

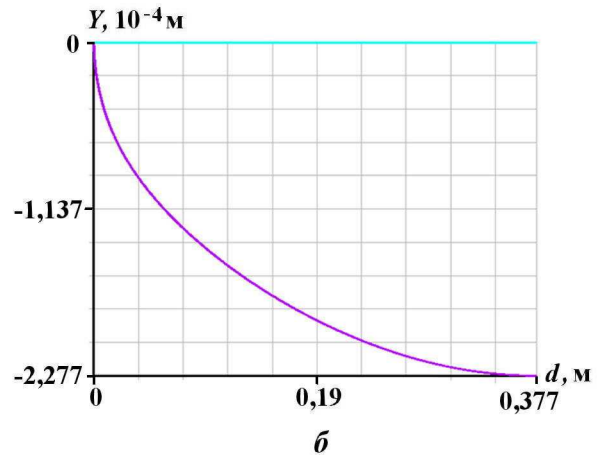
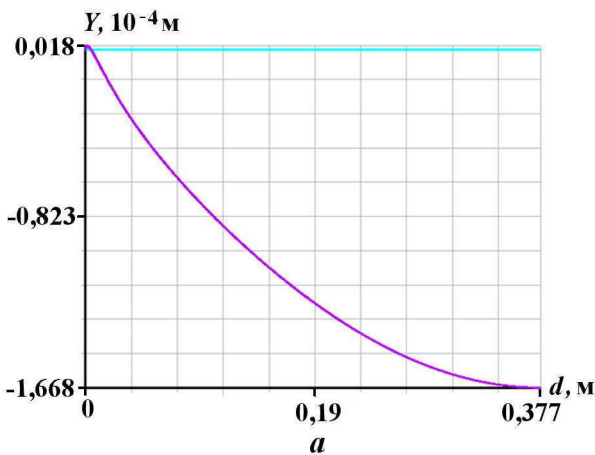


Рис. 7. Раскрытие трещины в зависимости от ее протяженности при  $2\varphi = 108^\circ$ : а — с учетом наплавки; б — без учета наплавки

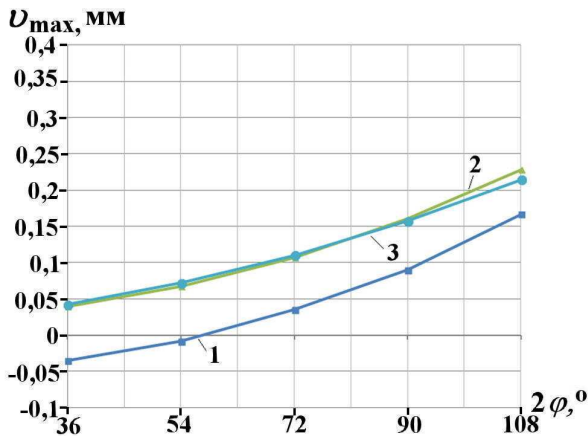


Рис. 8. Максимальное раскрытие трещин: 1 — с наплавкой; 2 — без наплавки; 3 — без наплавки по формуле (1)

Для определения максимального раскрытия трещин в трубопроводах с кольцевой трещиной без наплавки была использована аналитическая формула [1]

$$v_{\max} = \alpha(\lambda) \frac{2\sigma_m c}{E}, \quad (1)$$

где  $\alpha(\lambda) = (1 + 0,117\lambda^2)^{0,5}$ ,  $\lambda = \frac{[12(1 - \nu^2)^{0,5}]c}{(Rs)^{0,5}}$ ;  $c$  — полудлина трещины;  $E$  — модуль упругости Юнга;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $R$  — внутренний радиус трубопровода;  $s$  — толщина стенки трубопровода.

Результаты, рассчитанные по аналитической формуле (1), показывают удовлетворительное совпадение аналитических подходов оценки раскрытия трещин (кривая 3 на рис. 8) с численными расчетами (кривая 2).

Далее на рис. 9 показано влияние наплавки на раскрытие трещин в зависимости от их длин по окружности, переведенных в градусы. Это влияние характеризует множитель  $\beta$ , показывающий, во сколько раз площадь раскрытия трещины в трубопроводе без наплавки больше, чем в трубопроводе с наплавкой.

Из рис. 9 следует, что в ГЦТ на АЭС типа РБМК-1 000 наплавка оказывает влияние на трещины при  $2\varphi = 0 \div 144^\circ$ . Раскрытия трещины не происходит при  $2\varphi = 0 \div 60^\circ$ , а при  $2\varphi = 60 \div 144^\circ$  площадь раскрытия трещины меньше для трубопровода с наплавкой. Функция, описывающая влияние наплавки на рис. 9, имеет вид

$$y = 10,344x^{-1,719},$$

$$y \geq 1 \text{ при } x = 60 \div 144^\circ.$$

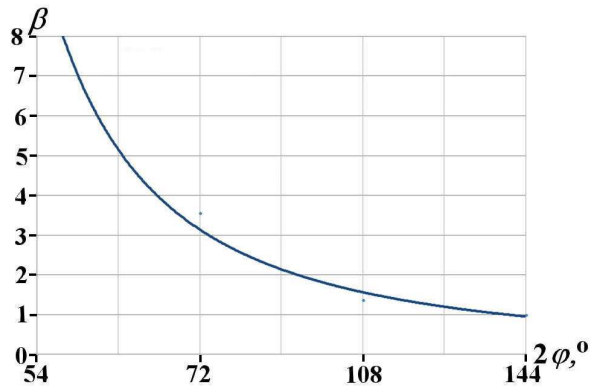


Рис. 9. Влияние наплавки на раскрытие трещин в зависимости от их длин в ГЦТ на АЭС типа РБМК-1 000

### Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Для ГЦТ на АЭС типа РБМК-1 000 (с наплавкой) трещины, длины которых соответствуют углу  $2\varphi = 0 \div 60^\circ$ , не раскрываются при нормальных условиях эксплуатации, а для трещин, длины которых соответствуют углу  $2\varphi = 60 \div 144^\circ$ , раскрытие происходит, но с меньшими площадями раскрытия трещин, чем для аналогичных трубопроводов без наплавки.

Выводы, полученные в данной работе, являются оценочными и показывают возможное влияние на применимость концепции безопасности ТПР.

### Список литературы

1. Гетман А. Ф. Концепция безопасности "течь перед разрушением" для сосудов и трубопроводов давления АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1999.
2. Руководство по применению концепции безопасности "течь перед разрушением" к трубопроводам действующих АЭУ. РД ЭО 1.1.2.05.0939, 2013. <http://docs.cntd.ru/document/415970489>.
3. US NRS Standart Review Plan, 3.6.3 Leak Before Break Evaluation Procedures. Washington: USNRC, 1986.
4. GRS. RSK Guidelines for Pressurized Water Reactors. <http://www.bmub.bund.de>.

Статья поступила в редакцию 02.10.15.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF AUSTENITIC STEEL SURFACING ON  
CRACK OPENING IN A PEARLITIC STEEL PIPELINE DN800 / D. A. Kuzmin (AO  
"VNIAES", Moscow).

The object of the study is a straight section of the main circulation pipeline from pearlitic steel with austenitic steel cladding. These steels have different linear expansion coefficients. The influence of the cladding on the opening of a through crack in the pipeline is studied. The size of crack opening and the shape of crack edges are determined for various crack lengths. A comparative analysis of the crack opening area for the pipeline with cladding and without it is made.

*Keywords:* main circulation pipeline, austenitic cladding, crack opening.

---