

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПЛАВКИ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ НА РАСКРЫТИЕ ТРЕЩИНЫ В ТРУБОПРОВОДЕ Ду850 ИЗ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

Д.А. КУЗЬМИН, аспирант  
109431, Москва, ул. Ферганская, 25, АО «ВНИИАЭС»  
Kuzmin\_DA@yahoo.com

*Исследован трубопровод с наплавкой. Показано, что происходит с основным металлом трубопровода, если он плакирован наплавкой, при нормальных условиях эксплуатации, исследованы полученные напряжения и деформации. Изучено влияние наплавки на образовавшуюся сквозную трещину в трубопроводе и ее влияние на раскрытие трещины.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трубопровод, наплавка, раскрытие трещины, деформация.

Концепция «течь перед разрушением» (ТПР) – это концепция конструирования сосудов давления, при котором полному разрушению сосуда предшествовала бы течь через относительно устойчивую трещину.

Обзор теории и практики применения концепции ТПР дан в работе [1]. Для применения концепции ТПР требуется правильно оценивать раскрытие трещин и ее размеры. Критический размер трещин – 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 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 учитывают существующие нормативные документы, регулирующие применение концепции ТПР на АЭС как в России [2], так и за рубежом, в частности, 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 действительности наплавка оказывает существенное влияние на раскрытие трещины, так как сжимающие напряжения в ней при работе реактора, например, ВВЭР-1000 близки к напряжениям предела текучести [1].

Действительно, при разогреве реактора с  $20^{\circ}\text{C}$  до  $300^{\circ}\text{C}$  получим термические напряжения сжатия в наплавке  $-283$  МПа (расчет будет показан далее).

Следует отметить, что ряд исследователей считает, что после изготовления трубопровода в наплавке остаются при нормальной температуре напряжения растяжения. В действительности эти напряжения релаксируются при первых циклах гидравлических испытаний (ГИ) на прочность, которые проводят до начала эксплуатации.

При давлении ГИ  $p_{\text{ГИ}} = 24,5$  МПа и нормальной температуре в трубопроводе возникают напряжения растяжения равные [5]

$$\sigma_{\text{ГИ}} = \frac{p_{\text{ГИ}} R}{S} = \frac{24,5 \cdot 495}{70} \text{ МПа} = 173,3 \text{ МПа},$$

где  $R$  – срединный радиус главного циркуляционного трубопровода ВВЭР-1000,  $S$  – толщина стенки трубопровода с учетом наплавки.

Так как остаточные напряжения в наплавке не могут превышать предел текучести, то в результате ГИ напряжения в наплавке релаксируют с  $+216$  МПа до  $+42,7$  МПа. С учетом термического воздействия напряжения при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) составляют:

$$-283 + 42,7 = -240,3 \text{ МПа} > R_{p0,2} \text{ (при } t = 300^{\circ}\text{C}).$$

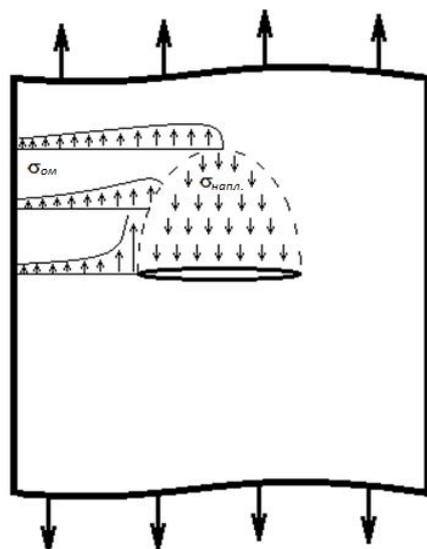


Рис. 1. Действие напряжений в области трещины

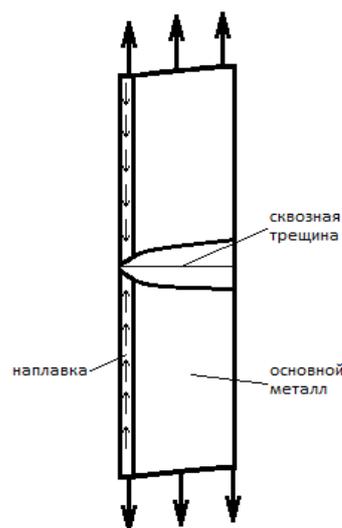


Рис. 2. Действие напряжений в области трещины

Так как эти напряжения выше  $R_{p0,2}$ , то в действительности в наплавке будут напряжения сжатия:  $\sigma_{\text{напл.}}^{t=300^{\circ}\text{C}} = -177 \text{ МПа}$ .

Напряжения  $\sigma_{\text{ом}}$  в основном металле раскрывают трещину, а напряжения  $\sigma_{\text{напл.}}$  в наплавке закрывают, вид распределений показан на рис. 1, а на рис. 2 вид разреза вдоль образующей трубопровода.

Практика эксплуатации дает пример, когда сквозная трещина длиной 1300 мм в основном металле с толщиной стенки 170 мм удерживалась наплавкой толщиной 7 мм при давлении 160 атм.

В данной статье исследовано влияние разницы коэффициентов температурного расширения основного металла из перлитной стали и наплавки из не-

ржавеющей аустенитной стали на возможность обеспечения безопасности эксплуатации главных циркуляционных трубопроводов АЭС.

Главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ) на АЭС типа ВВЭР-1000 имеет внутренний диаметр 850 мм, толщину 70 мм, где основной металл (1) 63 мм из стали 10ГН2МФА, а антикоррозионная наплавка (2) 7 мм из стали 08Х18Н10Т (см. рис. 3).

Механические характеристики стали 10ГН2МФА:  $E = 195 \text{ ГПа}$ ,

$$\alpha = 13,1 \text{ мкК}^{-1}, R_{p0,2} = 304 \text{ МПа}, R_m = 491 \text{ МПа}, \text{ при } t = 300^{\circ} \text{С}.$$

Механические характеристики стали 08Х18Н10Т:  $E = 180 \text{ ГПа}$ ,

$$\alpha = 17,4 \text{ мкК}^{-1}, R_{p0,2} = 177 \text{ МПа}, R_m = 412 \text{ МПа}, \text{ при } t = 300^{\circ} \text{С}.$$

Теплоноситель ГЦТ – вода с температурой  $300^{\circ} \text{С}$  и давлением 16 МПа.

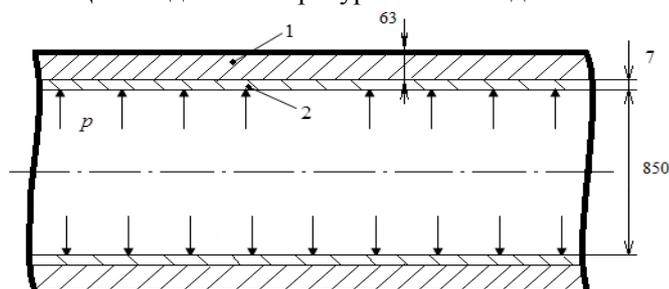


Рис. 3. Элемент трубопровода Ду850

Прямолинейный участок трубопровода рассмотрен в программном комплексе ANSYS. Решение задачи выполнено в упругой постановке:

- 1) прямолинейный участок трубопровода находится под действием внутреннего давления  $p = 16 \text{ МПа}$ ;
- 2) эта же часть трубопровода нагревается до температуры  $t = 300^{\circ} \text{С}$ ;
- 3) проводится суперпозиция результатов.

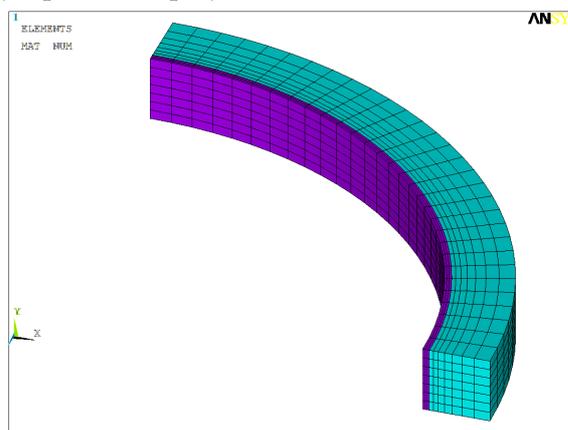


Рис. 4. Конечно-элементная сетка

Для решения задачи рассмотрена четверть окружности трубопровода протяженностью 70 мм и толщиной 70 мм, где 63 мм – основной металл, а 7 мм – наплавка. Далее разбивается модель на конечные элементы (см. рис. 4).

Далее представлены три рисунка с напряженно-деформированным состоянием (НДС) трубопровода при различных начальных условиях:

- 1) внутреннее давление  $p = 16 \text{ МПа}$  (см. рис. 5);
- 2) температурное воздействие  $t = 300^{\circ} \text{С}$  (см. рис. 6);

3) внутреннее давление  $p = 16 \text{ МПа}$  и температурное воздействие  $t = 300^\circ \text{C}$  (см. рис. 7).

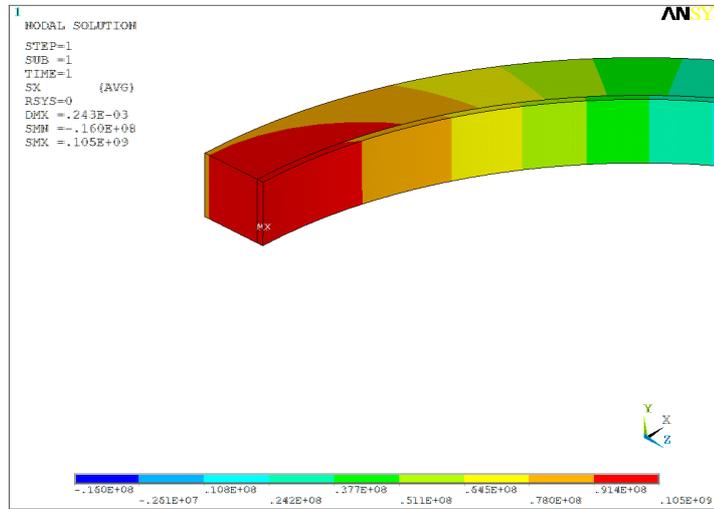


Рис. 5. Напряжение  $\sigma_x$ , ( $\sigma_\theta$  - на торце YZ), (Па)

Полученный результат на рис. 5 ( $\sigma_\theta = 105 \text{ МПа}$ ) можно проверить с помощью уравнения сопротивления материалов:

$$\sigma_\theta = \frac{pR}{S}, \quad \sigma_\theta = \frac{16 \text{ МПа} \cdot 495}{70} = 113,1 \text{ МПа}. \quad (1)$$

Расхождение результатов удовлетворительное.

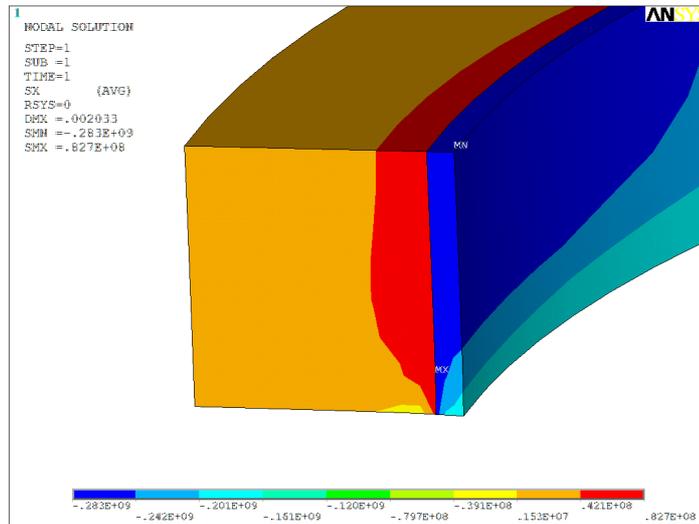


Рис. 6. Напряжение  $\sigma_x$ , ( $\sigma_\theta$  - на торце YZ), (Па)

Полученный результат на рисунке 6 ( $\sigma_\theta = -283 \text{ МПа}$ ) можно проверить с помощью норм расчета на прочность [5].

Нижняя граница напряжений в наплавке при условии, что толщина наплавки равна толщине основного металла, определяется по формуле:

$$\sigma_{\theta} = T\Delta\alpha \frac{1}{2(1-\nu)} E = 300\text{град} \cdot (17,4 - 13,1) \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}} \cdot \frac{1}{2(1-0,3)} \cdot 2 \cdot 10^{11} \text{Па} = 184 \text{МПа},$$

Максимальное возможное напряжение в наплавке (когда наплавка находится на абсолютно жестком основании) определяется по формуле:

$$\sigma_{\theta} = T\Delta\alpha \frac{1}{(1-\nu)} E = 300\text{град} \cdot (17,4 - 13,1) \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{град}} \cdot \frac{1}{(1-0,3)} \cdot 2 \cdot 10^{11} \text{Па} = 369 \text{МПа}.$$

Проверка подтверждает корректность полученных результатов:

$$\sigma_{\theta} = 184 < 283 < 369 \text{ (МПа)}.$$

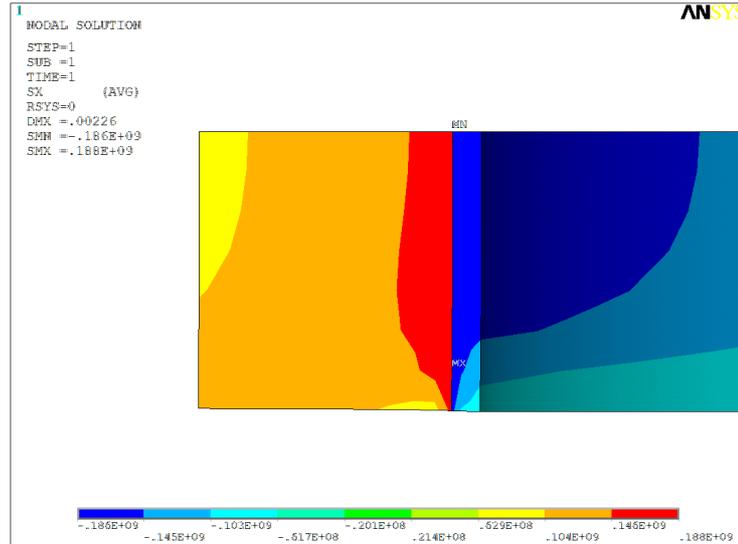


Рис. 7. Напряжение  $\sigma_x$ , вид с торца YZ, ( $\sigma_{\theta}$  - на торце YZ), (Па)

Вышеописанные результаты показывают, какое влияние наплавка оказывает на основной металл. Наплавка находится в сжатом состоянии, тем самым растягивает основной металл в месте наплавки, что существенно сказывается на напряженно-деформированном состоянии основного металла.

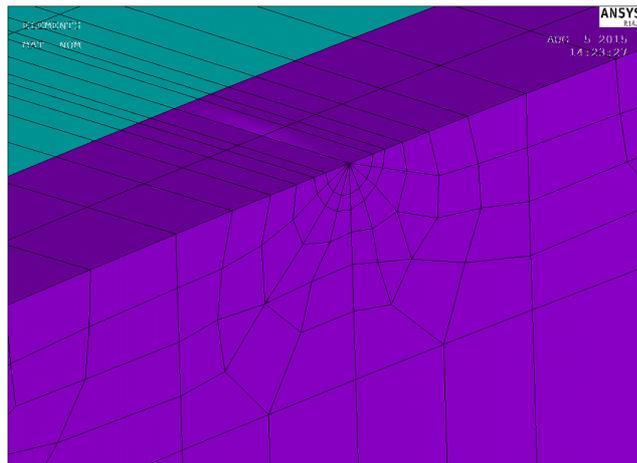


Рис. 8. Конечно-элементная сетка в области трещины

Ниже рассмотрена аналогичная задача, но со сквозной трещиной. Построена модель прямолинейного участка трубопровода длиной 200 мм, толщиной 70 мм (в т.ч. основной металл 63 мм и наплавка 7 мм) и разбита на конечные эле-

менты (КЭ) типа solid186. Число конечных элементов 10390. Конечно- элементная сетка в области трещины – на рис. 8. Длины заложённых кольцевых трещин составляют:  $2\varphi = 30, 60, 90, 120$  и  $150$  градусов.

Середина трещины (линия симметрии) обозначена красным цветом и названа KRAI (см. рис. 9).

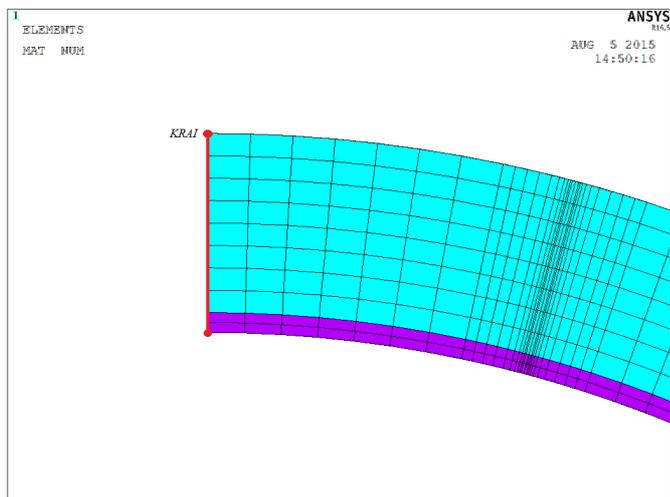


Рис. 9. Конечно-элементная сетка (вид сверху)

При данной постановке задачи интересна деформация середины трещины (линия KRAI) и длина трещины, при которой образуется беспрепятственное истечение теплоносителя. На рис. 10 показано деформированное состояние трещины, где  $\Delta_1$  – деформация по внутреннему радиусу трубопровода линии KRAI относительно фронта трещины в плоскости образования трещины, а  $\Delta_2$  – по внешнему.

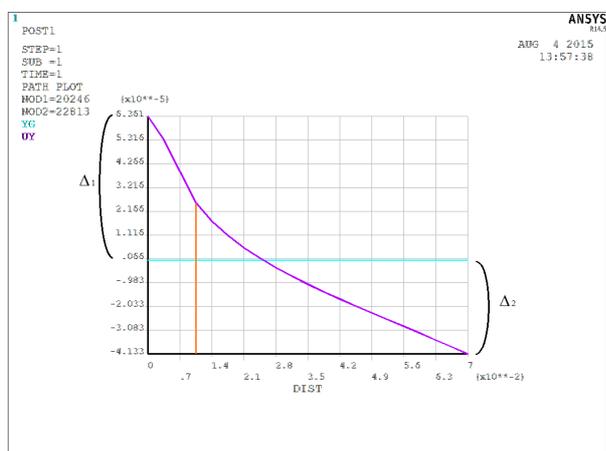


Рис. 10. График перемещений ( $U_y$ , м), при  $2\varphi = 30^\circ$

На рис. 10 показано, что наплавка термическими напряжениями сжатия закрывает трещину, что препятствует истечению теплоносителя. Ниже приведены результаты подобных задач с различной длиной трещины, длина трещины обозначена через угол  $2\varphi = 60, 90, 120$  и  $150$  градусов.

Из полученных данных на рис. 11 можно отметить, что трещина раскрывается в диапазоне угла:  $2\varphi = 90^\circ \div 120^\circ$ , а именно после экстраполяции  $2\varphi = 107^\circ$ . Мембранные напряжения, раскрывающие трещину, равны [5]:

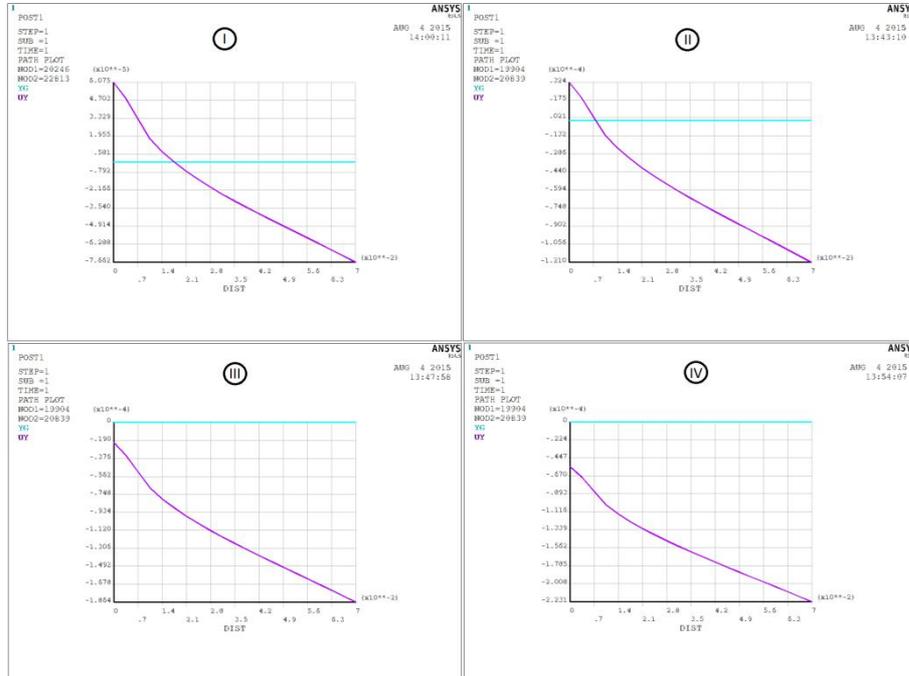


Рис. 11. Графики перемещений ( $U_y$ , м)

$I - 2\varphi = 60^\circ$ ,  $II - 2\varphi = 90^\circ$ ,  $III - 2\varphi = 120^\circ$ ,  $IV - 2\varphi = 150^\circ$

$$\sigma_m = \frac{pR}{2S} = \frac{16 \text{ МПа} \cdot 495}{2 \cdot 70} = 56.6 \text{ МПа} .$$

Для определения критической длины трещины использован метод нагрузки пластического шарнира (НПШ), результаты изображены на рисунке 12. Для сквозных трещин критический размер равен  $\varphi = 95^\circ$ , а для  $2\varphi = 190^\circ$ .

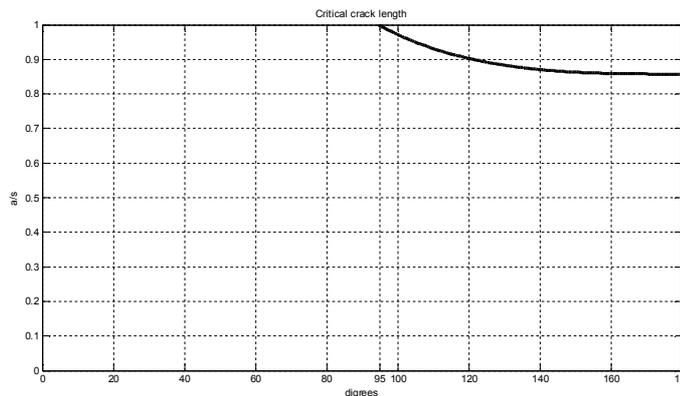


Рис. 12. График критических размеров трещин

Таким образом, выполненные оценки показали, что наплавка оказывает существенное влияние на раскрытие трещин. Трещина с учетом наплавки рас-

крывается, когда ее протяженность составляет  $2\varphi = 107^\circ$ , а без учета наплавки трещина раскроется при любых значениях  $2\varphi$ .

Л и т е р а т у р а

1. Гетман А.Ф. Концепция безопасности «течь перед разрушением» для сосудов и трубопроводов давления АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 258 с.
2. Руководство по применению концепции безопасности течь перед разрушением к трубопроводам действующих АЭУ. РД ЭО 1.1.2.05.0939, 2013. – 118 с.
3. US NRS Standard review plan, 3.6.3 Leak Before Break evaluation procedures, USNRC, Washington, DC, 1986.
4. GRS. RSK Guidelines for pressurized water reactors, 2nd Ed., 24 January 1979, including Appendix to Section 4.2; 3 rd Ed., 14 October 1981; Partly changes of RSK Guideline Sections 21.1 and 21.2, 1983.
5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 525 с.

References

1. Getman, A.F. (1999). «Leak Before Break» Safety Concept for NPP Pressure Vessels and Piping, Moscow: Energoatomizdat.
2. Guidance on the application of the safety concept «leak before break» operating pipelines NPP. RD EO 1.1.2.05.0939, 2013.
3. US NRS Standard review plan, 3.6.3 Leak Before Break evaluation procedures, USNRC, Washington, DC, 1986.
4. GRS. RSK Guidelines for pressurized water reactors, 2nd Ed., 24 January 1979, including Appendix to Section 4.2; 3 rd Ed., 14 October 1981; Partly changes of RSK Guideline Sections 21.1 and 21.2, 1983.
5. The Rules for Calculating the Strength of the Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Energoatomizdat. M., 1986.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF AUSTENITIC STEEL SURFACING ON CRACK OPENING OF PEARLITIC STEEL PIPELINE Du850**

Kuzmin D.A., *VNIIAES, Russia*

A pipeline with surfacing is investigated. It is shown what happens to the base metal of the pipeline if it is clad with surfacing under normal operating conditions and the obtained stresses and strains are investigated.

The influence of surfacing on the through crack in the pipeline was investigated and its influence on a crack opening was also studied.

KEY WORDS: pipeline, surfacing, crack opening, strain.

