

УДК: 621.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.002

© 2021. Все права защищены.

МЕТОД СХЕМАТИЗАЦИИ СОВОКУПНОСТИ НЕСПЛОШНОСТЕЙ В КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Антонов А. Ю.* (antonov@secnrs.ru),
Рубцов В. С.*, к. т. н. (vrubtsov@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 29 марта 2021 г.

Аннотация

Как показывают результаты контроля состояния металла трубопроводов атомных станций больших диаметров, сварные соединения данных трубопроводов могут содержать несколько несплошностей, расположенных по периметру соединения. В случаях если трубопровод, сварное соединение которого содержит обнаруженную совокупность несплошностей, планируется допустить к дальнейшей эксплуатации, возникает необходимость выполнения обоснования возможности безопасной эксплуатации данного трубопровода. Согласно требованиям российских федеральных норм и правил в области использования атомной энергии при обосновании возможности безопасной эксплуатации трубопровода несплошности должны быть схематизированы в виде эллипса, если они не выходят на поверхность соединения, или полуэллипса в обратном случае. Ввиду того, что несплошности расположены по всему периметру сварного соединения на большом расстоянии друг от друга, схематизация совокупности несплошностей в соответствии с положениями нормативной документации невозможна. Предложен консервативный метод схематизации совокупности несплошностей в кольцевых сварных соединениях трубопроводов атомных станций вне зависимости от относительного расположения несплошностей. Предлагаемый консервативный подход к схематизации несплошностей состоит в том, чтобы все несплошности объединить в одном месте, искусственно создав при этом очень большую по размерам «супертрещину». Приведено математическое описание предложенного метода, а также используемые допущения. Кроме того, приведены пример схематизации совокупности несплошностей с использованием предложенного метода и пример расчетного анализа возможности разрушения трубопровода, содержащего схематизированную по совокупности несплошностей «супертрещину».

► **Ключевые слова:** несплошность, трещина, трубопроводы атомных станций, сварное соединение, разрушение.

* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

METHOD OF IDEALIZATION OF A FLAW SET IN CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINTS OF THE NUCLEAR POWER PLANT PIPELINES

Antonov A. Y.*,
Rubtsov V. S.*, Ph. D.

Article is received on March 29, 2021

Abstract

The examination results of nuclear power plants pipelines of large diameter show that the welded joints of the pipelines might contain many flaws located along the circumference of the joint. If the pipeline, the welded joint of which contains the detected flaw set, is planned to be allowed for further operation the necessity of the safe operation justification of the pipeline occurs. In accordance with requirements of the Russian federal standards and rules in the field of atomic energy use when justifying the safe operation of the pipeline, it is necessary to idealize the flaw in a form of ellipse when the flaw comes out on the surface of the welded joint or semi-ellipse otherwise. Since the flaws are located along the perimeter of the welded joint and at great distance from each other, idealization of the flaw set is impossible in compliance with normative documentation. A conservative method of idealization of a flaw set in circumferential welding of pipelines of nuclear power plants independently to relative position of the flaws is proposed. With this conservative approach to idealization of the flaw set, all the flaws are unified at one place forming a single large-size “supercrack”. All the necessary assumptions and mathematical description of the method are provided. Moreover, an example of application of the method and an example of failure possibility analysis of a pipeline containing a flaw set forming a single “supercrack” are given.

► **Keywords:** *flaw, crack, pipelines of nuclear power plants, welded joint, failure possibility.*

* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

Введение

Анализ результатов контроля состояния металла трубопроводов атомных станций (АС) свидетельствует о том, что в одном сварном соединении трубопроводов АС может присутствовать несколько несплошностей.

Особенно это относится к трубопроводам больших диаметров, сварные соединения которых формируются множеством проходов сварочного аппарата. Формирование нового слоя наплавленного металла сварного соединения происходит на поверхности уже остывшего слоя, в результате чего возникают значительные температурные напряжения между слоями наплавленного металла сварного соединения, что и приводит к образованию несплошностей.

В случаях если трубопровод, сварное соединение которого содержит обнаруженную совокупность несплошностей, планируется допустить к дальнейшей эксплуатации, возникает необходимость выполнения обоснования возможности безопасной эксплуатации данного трубопровода на основе расчета конструкционной целостности сварного соединения, содержащего несплошности.

В данной статье предложен новый, консервативный метод схематизации совокупности далеко расположенных друг от друга несплошностей в кольцевых швах трубопроводов АС одиночной, эквивалентной несплошностью.

Существующие подходы к схематизации несплошностей

Согласно требованиям нормативных документов [1] и [2] и российских федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [3], в случае если по результатам неразрушающего контроля обнаружено несколько несплошностей в одном сварном соединении, то для расчетного анализа должна проводиться схематизация выявленных несплошностей для приведения их к одиночному расчетному дефекту.

Как отмечено в [1–3], несплошности должны быть схематизированы в виде эллипса, если они не выходят на поверхность, или полуэллипса в обратном случае.

В то же время, согласно [1–2], а также положениям российской нормативной документации, схематизация несплошностей возможна только для случаев, когда эти несплошности расположены достаточно близко друг к другу и точно известно расстояние между всеми несплошностями и их расположение по периметру сварного шва.

В рассматриваемом в данной статье случае несплошности расположены достаточно далеко друг от друга, поэтому оценка прочности таких сварных соединений невозможна при использовании вышеуказанных подходов.

Описание предлагаемого метода

Пусть имеется кольцевое сварное соединение трубопровода, содержащее несколько несплошностей, расположенных по периметру соединения (рис. 1а).

Несплошности в соответствии с [4] консервативно представляются в виде полуэллиптических поверхностных трещин, которые затем приводятся к единственной суммарной «супертрещине», при этом консервативно будем считать, что все несплошности лежат в плоскости, перпендикулярной оси трубопровода (рис. 1б, 1в).

Площадь схематизированной «супертрещины» определяется как сумма площадей всех несплошностей в металле рассматриваемого сварного шва, то есть:

$$S_s = \sum_{i=1}^n S_i, \quad (1)$$

где:

S_s – площадь схематизированной «супертрещины»;

S_i – площадь i -той несплошности;

n – количество несплошностей в сварном соединении.

Учитывая, что площадь эллипса равна произведению его полуосей, умноженному на число π , формулу (1) можно также записать в следующем виде:

$$S_s = \frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^n L_i h_i, \quad (2)$$

где:

L_i – длина i -той несплошности;

h_i – глубина i -той несплошности.

Очевидно, что размеры схематизированной «супертрещины» должны быть не меньше максимальных размеров несплошностей в данном сварном соединении.

В связи с этим размеры схематизированной «супертрещины» определяются следующими условиями:

$$\begin{cases} L_{max} \leq L_s; \\ h_{max} \leq h_s; \\ \frac{L_s}{h_s} = \frac{L_{max}}{h_{max}} \end{cases}, \quad (3)$$

где:

L_s – длина схематизированной «супертрещины»;

h_s – глубина схематизированной «супертрещины»;

L_{max} – наибольшая длина несплошностей в данном сварном шве;

h_{max} – максимальная глубина несплошностей в данном сварном шве.

В случае, когда первые два условия (3) не выполняются или когда $\sum L_i \cdot h_i < L_{max} \cdot h_{max}$, длина и глубина схематизированной «супертрещины» принимаются равными: $L_s = L_{max}$ и $h_s = h_{max}$. Если глубина схематизированной «супертрещины» превышает 0,75 от толщины стенки трубопровода, сварное соединение которого содержит совокупность несплошностей, «супертрещина» считается сквозной и данный трубопровод не допускается в эксплуатацию.

Наиболее опасным считается случай расположения несплошности на внутренней поверхности трубопровода, при этом несплошность считается полуэллиптической трещиной (раздел 5.8.5.2 [4]). Площадь полуэллиптической «супертрещины» определяется по зависимости:

$$S_s = \frac{\pi}{2} L_s h_s = \frac{\pi L_{max}}{2 h_{max}} h_s^2. \quad (4)$$

Из формулы (4) получаем, что высота схематизированной «супертрещины» будет равна:

$$h_s = \sqrt{\frac{2S_s h_{max}}{\pi L_{max}}}. \quad (5)$$

Используя (4) и (5) получаем, что длина схематизированной «супертрещины» будет равна:

$$L_s = \sqrt{\frac{2S_s L_{max}}{\pi h_{max}}}. \quad (6)$$

В доказательство консервативности предложенного метода схематизации несплошностей отметим, что так как все несплошности сосредоточены (объединены) в одном месте, искусственно создав при этом значительную по размерам «супертрещину», вероятность хрупкого разрушения трубопровода при этом будет максимальной, поскольку максимальным будет значение коэффициента интенсивности напряжений. Вероятность вязкого разрушения при этом также возрастет, так как часть несплошностей искусственно перемещаются из зоны сжимающих изгибных напряжений в зону растягивающих напряжений.

Пример использования метода схематизации совокупности несплошностей для определения размеров «супертрещины»

Приведем пример применения предложенного метода для схематизации совокупности несплошностей в кольцевых сварных соединениях трубопроводов АС с условным диаметром 800 мм и толщиной стенки 38 мм. Выбранные для примера сварные соединения трубопроводов содержат некоторое количество несплошностей, выявленных при неразрушающем контроле. В таблице ниже приведены примеры результатов схематизации наиболее опасных допущенных в эксплуатацию трещиноподобных дефектов трубопроводов АС.

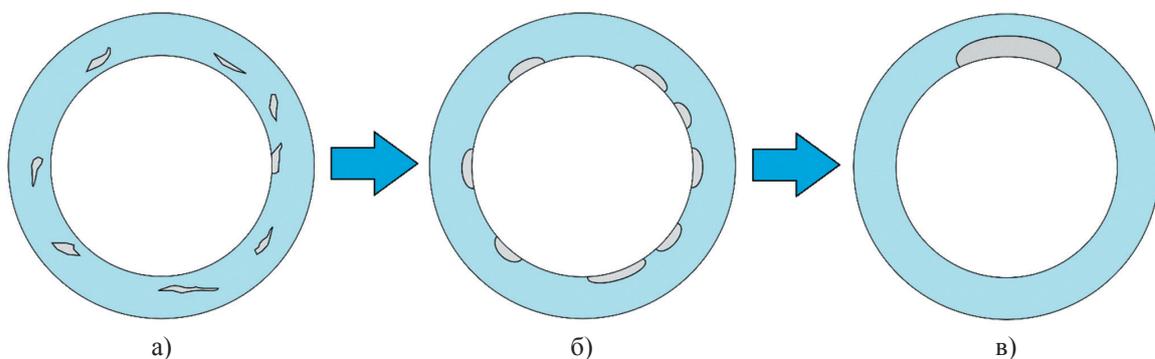


Рис. 1. Схема приведения совокупности несплошностей к единственной «супертрещине» в кольцевом сварном соединении трубопровода:

- а – сварное соединение трубопровода, содержащее совокупность несплошностей;
- б – схематизация несплошностей в виде поверхностных полуэллиптических трещин;
- в – объединение полуэллиптических трещин в одну «супертрещину»

[Fig. 1. Process of forming the single “super-crack” from a flaw set in a circumferential welded joint of the pipeline:
 a – welded joint of the pipeline containing a flaw set; b – idealization of the flaws in form of the surface semi-elliptical cracks;
 c – unification of the semi-elliptical crack into the single “super-crack”]

Таблица

**Примеры результатов схематизации наиболее опасных допущенных
в эксплуатацию трещиноподобных дефектов трубопроводов атомных станций
Examples of the results of idealization of the most dangerous crack-like flaws
in pipelines of nuclear power plants allowed to operation**

№	Тип дефекта	Характеристика дефекта	Характеристики единичного дефекта
1	Несплошность, 4 шт.	$L = 239 \text{ мм}, h = 5 \text{ мм}$ $L = 35 \text{ мм}, h = 5,5 \text{ мм}$ $L = 25 \text{ мм}, h = 4 \text{ мм}$ $L = 11 \text{ мм}, h = 4,5 \text{ мм}$	$L_s = 258,4 \text{ мм}, h_s = 5,9 \text{ мм}$
2	Несплошность, 6 шт.	$L = 97 \text{ мм}, h = 6,5 \text{ мм}$ $L = 21 \text{ мм}, h = 6,5 \text{ мм}$ $L = 20 \text{ мм}, h = 4,5 \text{ мм}$ $L = 21 \text{ мм}, h = 2 \text{ мм}$ $L = 24 \text{ мм}, h = 5 \text{ мм}$ $L = 80 \text{ мм}, h = 5 \text{ мм}$	$L_s = 145,5 \text{ мм}, h_s = 9,7 \text{ мм}$
3	Несплошность, 6 шт.	$L = 105 \text{ мм}, h = 7 \text{ мм}$ $L = 87 \text{ мм}, h = 10,5 \text{ мм}$ $L = 66 \text{ мм}, h = 10 \text{ мм}$ $L = 53 \text{ мм}, h = 10 \text{ мм}$ $L = 43 \text{ мм}, h = 9 \text{ мм}$ $L = 124 \text{ мм}, h = 9 \text{ мм}$	$L_s = 226,4 \text{ мм}, h_s = 19,2 \text{ мм}$
4	Несплошность, 9 шт.	$L = 18 \text{ мм}, h = 4 \text{ мм}$ $L = 36 \text{ мм}, h = 5 \text{ мм}$ $L = 34 \text{ мм}, h = 5,5 \text{ мм}$ $L = 25 \text{ мм}, h = 5 \text{ мм}$ $L = 32 \text{ мм}, h = 4 \text{ мм}$ $L = 139 \text{ мм}, h = 5,5 \text{ мм}$ $L = 7 \text{ мм}, h = 4 \text{ мм}$ $L = 7 \text{ мм}, h = 4 \text{ мм}$ $L = 195 \text{ мм}, h = 6 \text{ мм}$	$L_s = 295,3 \text{ мм}, h_s = 9,1 \text{ мм}$

Пример применения метода схематизации совокупности несплошностей к анализу возможности разрушения трубопроводов атомных станций

Проиллюстрируем применение предложенного метода схематизации совокупности несплошностей в кольцевых сварных соединениях трубопроводов АС с условным диаметром 800 мм и толщиной стенки 38 мм при анализе возможности их разрушения с использованием программы для электронных вычислительных машин “ISAAC”.

Программа “ISAAC” специально разработана организацией научно-технической поддержки регулятора Швеции компанией “Kiwa Inspecta” для выполнения независимых экспертных расчетных оценок опасности разрушения оборудования и трубопроводов АС при наличии в них наиболее опасных типов несплошностей – трещин. Данная программа

позволяет выполнять расчет подрастания несплошностей при длительном циклическом нагружении и за счет межкристаллитной коррозии под напряжением. В программе “ISAAC” для оценок целостности трубопроводов реализуется двухпараметрический метод R6, приведенный в [1], согласно которому оценки целостности проводятся как по критериям вязкого, так и по критериям хрупкого разрушения.

Лицензия на использование программы “ISAAC” была официально приобретена ФБУ «НТЦ ЯРБ» в 2019 г. с проведением соответствующего курса обучения.

Пример расчета критических размеров схематизированной «супертрещины» в сварном соединении трубопровода Ду800, а также диаграммы конструкционной целостности по методу R6 с использованием программы “ISAAC” приведены на рис. 2–5.

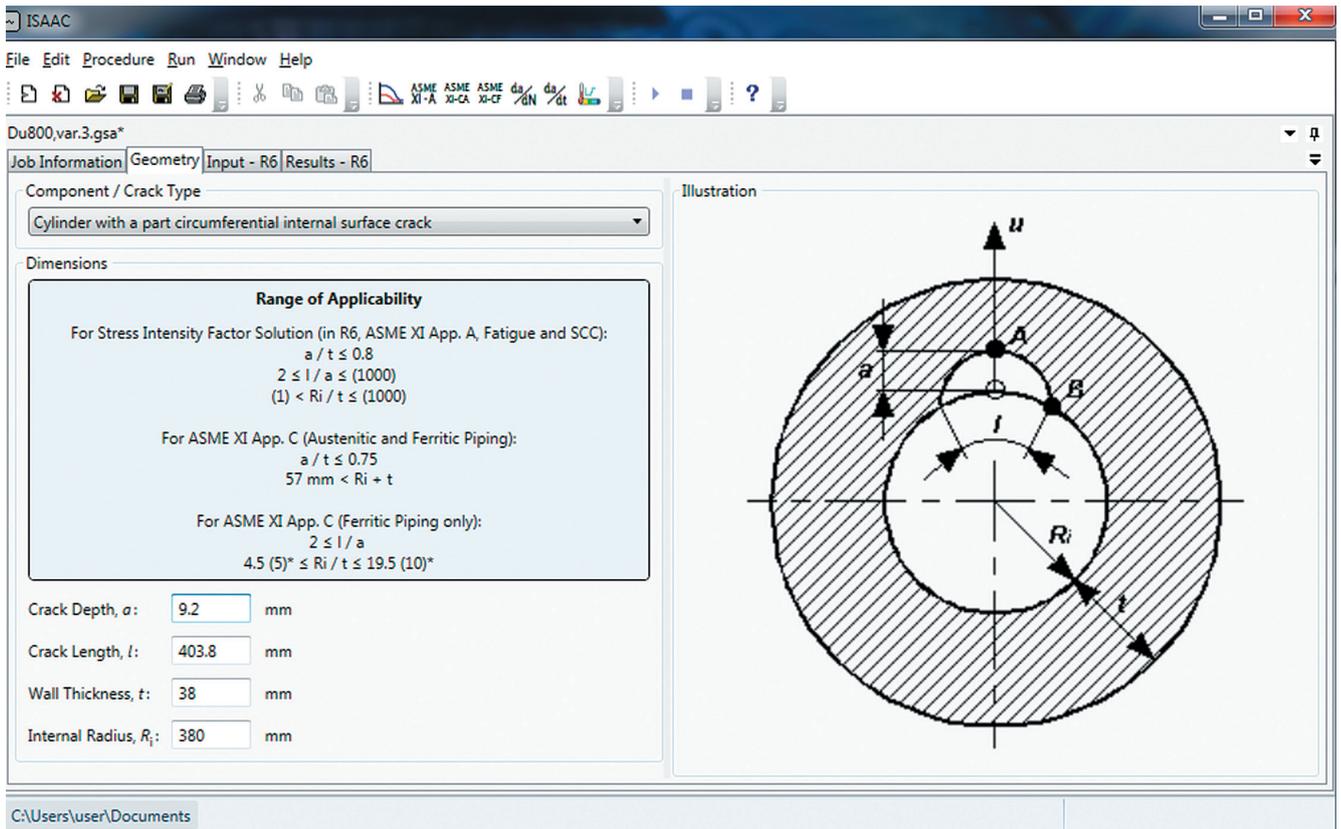


Рис. 2. Исходные данные по начальным геометрическим характеристикам трубопровода Ду800 по глубине и протяженности постулированной «супертрещины», схематизированной на основе совокупности несплошностей сварного соединения
 [Fig. 2. Input data of initial size of the cross-section of a pipeline Dn800 and postulated “supercrack” formed from a flaw set]

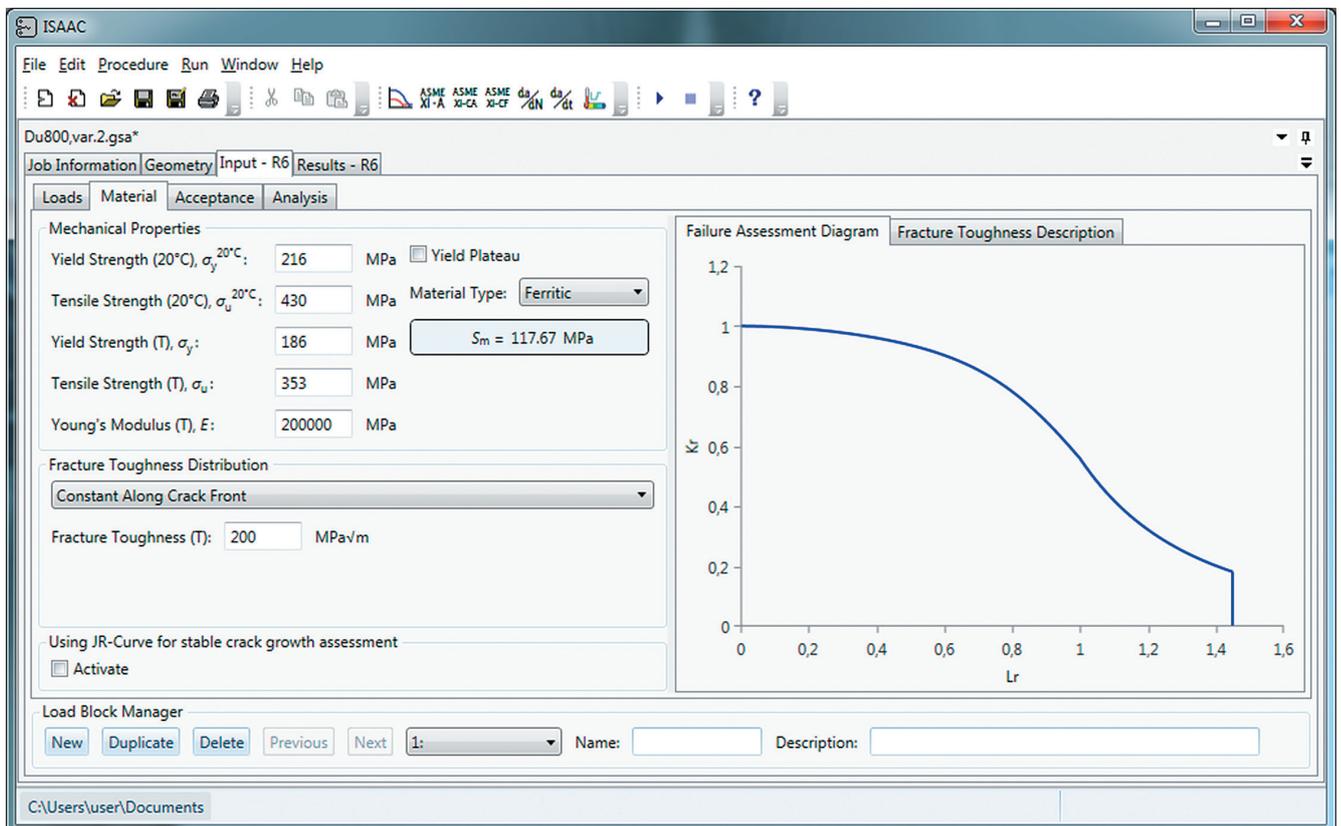


Рис. 3. Механические характеристики металла трубопровода Ду800
 [Fig. 3. Mechanical properties of metal of the pipeline Dn800]

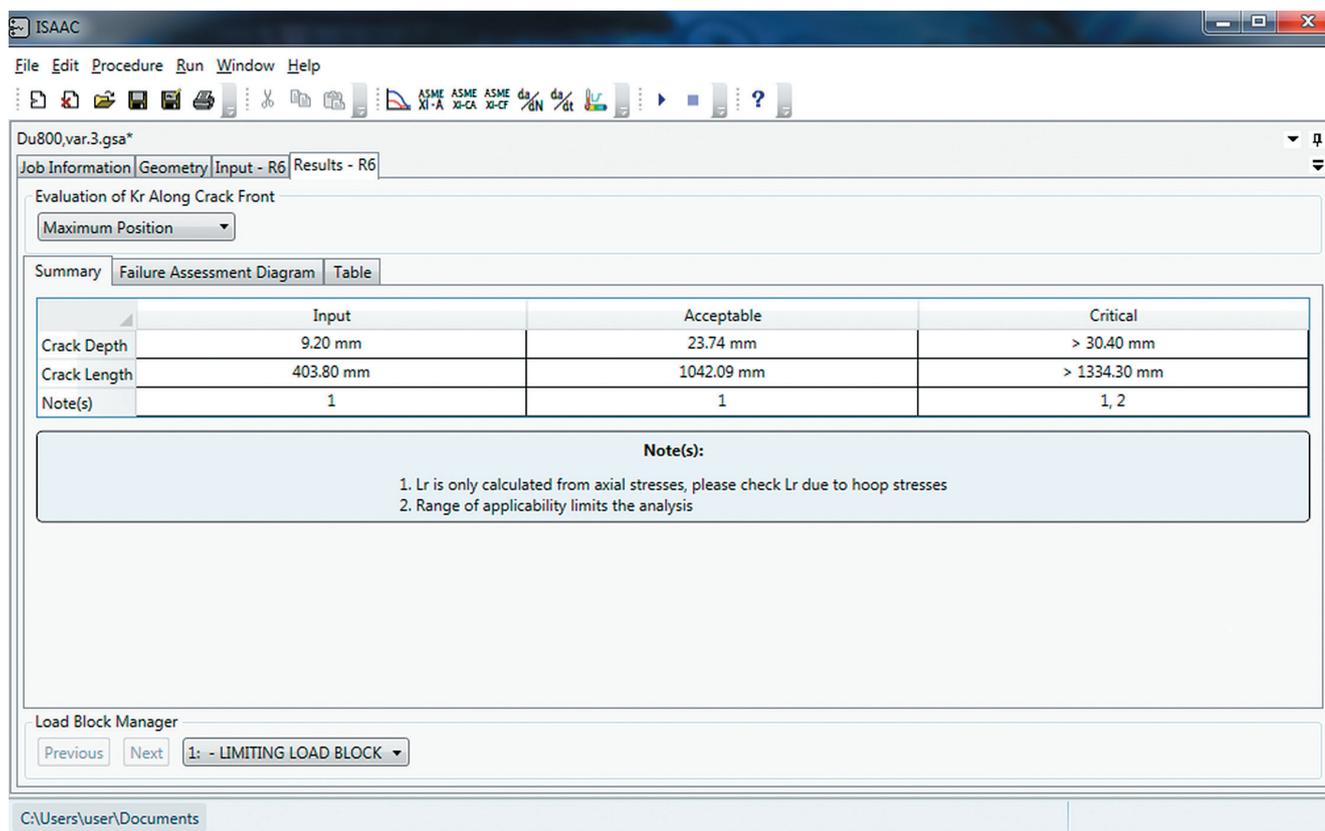


Рис. 4. Расчетные критические размеры трещины для сварного соединения трубопровода Ду800
 [Fig. 4. Calculated critical size of a crack for a welded joint of the pipeline Dn800]

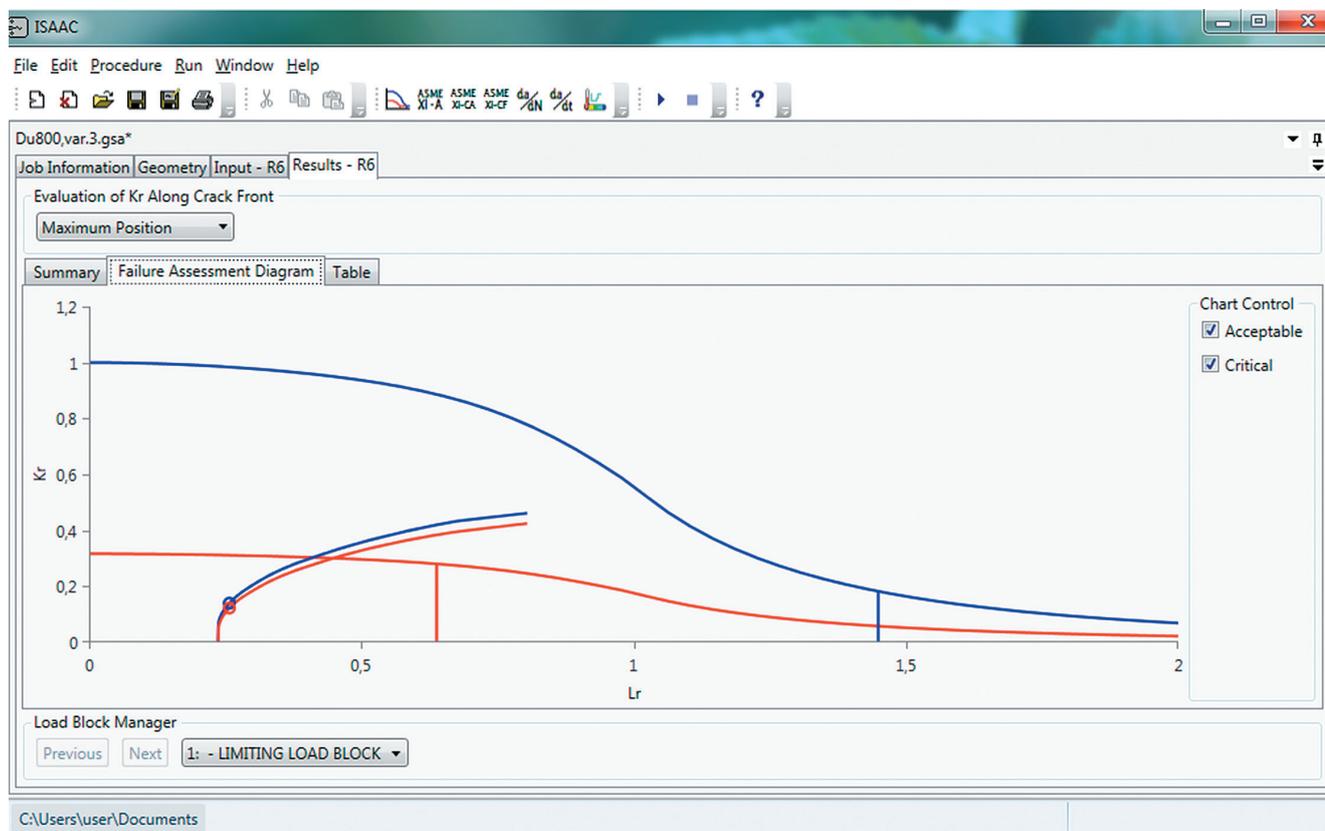


Рис. 5. Диаграмма конструктивной целостности для сварного соединения трубопровода Ду800, построенная в рамках метода R6
 [Fig. 5. The diagram of structural integrity for a welded joint of the pipeline Dn800 produced by R6-method]

На рис. 2 и 3 приведены исходные данные для определения критических размеров схематизированной «супертрещины» в сварном соединении трубопровода Ду800 и способ их задания в программе "ISAAC".

Как видно из рис. 4 и 5, несмотря на значительный консерватизм предложенного метода схематизации, размеры схематизированной «супертрещины» не превышают предельных значений, а критерии конструкционной целостности по методу R6 для сварного соединения трубопровода Ду800 выполняются с запасом. Из этого следует, что эксплуатация трубопровода Ду800, содержащего несколько несплошностей, допустима без выполнения ремонта указанного сварного соединения.

Заключение

Разработанный консервативный метод схематизации совокупности несплошностей в кольцевых сварных соединениях трубопроводов АС может применяться при проведении расчетного анализа возможности разрушения трубопроводов АС больших диаметров.

Преимущества предложенного метода перед применяемыми в настоящее время подходами к схематизации несплошностей состоят в следующем:

- существующие подходы к схематизации совокупности несплошностей применяются при

малых расстояниях между соседними несплошностями, тогда как предложенный метод позволяет произвести схематизацию несплошностей, находящихся на любом расстоянии друг от друга;

- для применения существующих подходов к схематизации несплошностей требуются точные данные о расстояниях между несплошностями и расстояниях до внутренней или наружной поверхностей трубопровода АС, в то же время для предложенного метода схематизации несплошностей данные сведения не являются необходимыми;

- предложенный метод схематизации несплошностей позволяет выполнить процедуру расчетного обоснования конструкционной целостности сварного соединения трубопровода АС для любого количества, геометрических размеров и взаимного расположения несплошностей.

Пример расчетного анализа возможности разрушения трубопровода АС, содержащего схематизированную по совокупности несплошностей «супертрещину», показал, что, несмотря на значительный консерватизм предложенного метода схематизации, размеры схематизированной «супертрещины» не превышают предельных значений, а критерии конструкционной целостности по методу R6 для сварного соединения трубопровода Ду800 выполняются с запасом.

Литература

1. R6 Assessment of the integrity of structures containing defects, Revision 4. – British energy, Gloucester, UK, 2000. – 129 p.
2. ASME Boiler and Pressure Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, New York, USA, 2019. – 684 p.
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций. НП-084-15: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 декабря 2015 г. № 502.
4. Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86: утверждены постановлением Госатомэнергонадзора СССР от 05.11.1986 № 5.

References

1. R6 Assessment of the integrity of structures containing defects, Revision 4. – British energy, Gloucester, UK. 2000. 129 p.
2. ASME Boiler and Pressure Code, Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. New York, USA. 2019. 684 p.
3. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii "Pravila kontrolya osnovnogo metalla, svarnykh soyedineniy i naplavlennykh poverkhnostey pri ekspluatatsii oborudovaniya, truboprovodov

i drugikh elementov atomnykh stantsiy” [Federal nuclear safety regulations “Unified Inspection Procedures for Base Materials, Weld Joints and Build-Ups in the Course of Operation of Equipment, Pipelines and Other Elements of Nuclear Power Plants”]. 2015.

4. Pravila i normy v atomnoy energetike “Normy rascheta na prochnost’ oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok” [Rules and regulations in the nuclear power industry “Strength Calculation Standards for Equipment and Pipelines of Nuclear Power Installations”]. 1986.

Сведения об авторах

Антонов Антон Юрьевич, старший научный сотрудник отдела прочности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Рубцов Валерий Семёнович, начальник отдела прочности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Author credentials

Antonov Anton Yurievich, Senior Researcher of Strength Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: antonov@secnrs.ru.

Rubtsov Valery Semyonovich, Head of Strength Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: vrubtsov@secnrs.ru.

Для цитирования

Антонов А. Ю., Рубцов В. С. Метод схематизации совокупности несплошностей в кольцевых сварных соединениях трубопроводов атомных станций // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 2 (100). С. 20–28. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.002.

For citation

Antonov A. Y., Rubtsov V. S. Method of idealization of a flaw set in circumferential welded joints of the nuclear power plant pipelines. Nuclear and Radiation Safety, 2021, no. 2 (100), pp. 20–28. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.100.2.002 [in Russian].

