

УДК 621.721.052:539.4.014

Прохоренко В.М., Перепичай А.А., Зворыкин К.О.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт».  
Украина, г. Киев

### РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В КОЛЬЦЕВОМ ШВЕ ПАРОПРОВОДА, ИНИЦИИРОВАННОЙ НЕПРОВАРОМ, НАПРЯЖЕНИЯМИ ОТ СВАРКИ И ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКОЙ

#### Анотація

*У роботі пропонується алгоритм розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) для природної загостреної тріщини, яка з різних причин під час зварювання або в процесі експлуатації може виникнути від вершини непровару в корені кільцевого зварного шва. У основу алгоритму покладені основні уявлення теорії тріщин, силовий критерій Ірвіна і результати кінцево-елементного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) від зварювання кільцевих стиків, а також сумарного залишкового НДС від зварювання і подальшої дії характерного для паропроводів зовнішнього навантаження.*

#### Abstract

*In this paper we propose an algorithm for calculating the stress intensity factors for natural pointed cracks, which, for various reasons during the operation may occur from the top of the annular lack of penetration at the root of the weld. The algorithm laid the basic concepts of the theory of cracks, force criterion of Irwin and the results of modern finite element simulation of the total residual stress-strain state (SSS) of the weld joints of the ring and the subsequent application of steam to the characteristic of the external load.*

#### Введение

На нефтеперерабатывающих и других предприятиях для реализации различных технологических процессов используются паропроводы. В большинстве случаев для их изготовления используется сталь 20 по ГОСТ 8731-74. В качестве заготовок применяются бесшовные горячедеформированные трубы диаметром 89, 108, 159 и 219 мм с толщиной стенки 6 мм. Трубчатые заготовки свариваются кольцевыми швами с V-образной разделкой свариваемых кромок С17 по ГОСТ № 5264-80 способом ручной дуговой сварки.

Допускается заварка стыка за один или два прохода электродами УОНИ 13-55 на режиме: сварочный ток до  $I = 120$  А, напряжение на дуге  $U = 23 - 25$  В, скорость сварки  $V = 7$  м/час. Химический состав стали 20 приведен в таблице 1.

По причине влияния человеческого фактора способ ручной дуговой сварки отличается нестабильностью условий сварки и поэтому в сварных швах кольцевых стыков паропроводов часто возникают трещиноподобные технологические дефекты в виде непроваров в корне шва различной глубины и протяженности по окружности трубы.

Нормативной документацией [1] в кольцевых швах допускаются непровары глубиной не более 20 % от толщины стенки трубы и общей протяженностью по окружности не более 25 % от её длины по внутреннему диаметру трубы. Обнаруживаются



Таблица 1

Сталь	Содержание легирующих элементов в стали, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
20	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	0,04	0,04	0,25	0,25	0,25	0,05

непровары рентгенконтролем сварных стыков после изготовления паропровода, а также при последующих его периодических обследованиях. Непровар в корне шва считается трещиноподобным дефектом и является значительным концентратором напряжений и пластических деформаций от сварки и внешних нагрузок.

Внешними нагрузками для паропроводов являются давление пара в трубе до 10 МПа с температурой 350 °С, сезонные изменения температуры воздуха, собственный вес паропровода между опорами, изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях, реакции от его закрепления на опорах и др. В среднем два раза в неделю паропровод останавливается по технологическим причинам со сбросом давления пара и рабочей температуры. Неблагоприятная совокупность условий эксплуатации может способствовать образованию в вершине непровара естественной микротрещины, распространяющейся мгновенно или постепенно в направлении толщины стенки трубы. Возможна остановка движущейся трещины на некотором расстоянии от внешней поверхности трубы, что определяется уровнем и характером нагружения кольцевого стыка и допустимым значением трещиностойкости металла шва. Возможностью развития такого процесса не следует пренебрегать, учитывая объемность НДС в области непровара, откуда и начинается свое развитие естественная трещина. Сказанное выше определяет цель данной работы, состоящую в следующем:

– для трещины в кольцевом шве паропровода, инициированной нормативно допустимым непроваром корня шва и действующими напряжениями от сварки и эксплуатационных нагрузок и именуемой согласно классификации дефектов в трубах [2] как поверхностная внутренняя кольцевая трещина, разработать алгоритм расчета КИН и обосновать корректность использования силового критерия линейной механики разрушения для оценки статической прочности кольцевых стыков технологических паропроводов с нормативно допустимым непроваром корня шва;

– сравнить расчетные значения КИН с допустимым значением трещиностойкости металла шва и дать оценку статической прочности кольцевого стыка паропровода с нормативно допустимым трещиноподобным дефектом.

Трещина прорастает от непровара в толщину стенки трубы к ее внешней поверхности. Силовым

фактором являются суммарные напряжения от максимально возможной внешней нагрузки вместе с остаточными сварочными, каким-то образом изменившимися под влиянием приложенной внешней нагрузки. Внешняя, особенно растягивающая, нагрузка на сварную конструкцию может вызвать изменение первоначально установившихся после сварки остаточных напряжений [3]. Причиной этого является уменьшение или перераспределение сформировавшихся к концу полного охлаждения после сварки остаточных относительных объемов пластического деформирования [3].

Иногда при сварке с последующим внешним нагружением заметного изменения остаточных сварочных напряжений не происходит. Закономерности суммирования остаточных напряжений от сварки с напряжениями от внешней нагрузки в настоящее время недостаточно изучены. Для выяснения данного вопроса в каждом конкретном случае необходимо решать сложную упруго-пластическую задачу о суммировании указанных напряженно-деформированных состояний [3]. Во многих случаях при воздействии на сварную конструкцию внешних нагрузок остаточные сварочные напряжения в какой-то мере уменьшаются (релаксируют). Существует даже способ уменьшения остаточных сварочных напряжений за счет внешнего нагружения [3].

В данной работе остаточное НДС в зоне кольцевого стыка паропровода от сварки, суммарное от сварки и послесварочного нагружения, а также после снятия внешней нагрузки определяли расчетным путем, используя для этого современный специализированный инженерно-научный вычислительный комплекс.

Данное исследование выполнено применительно к паропроводу диаметром 89 мм с толщиной стенки 6 мм. Глубина и протяженность непровара приняты максимально допустимыми по [1], а именно, глубина в направлении толщины стенки трубы  $h_{\text{непр}} = 1,2$  мм, длина хорды окружности по внутреннему диаметру трубы между концами непровара  $2l = 60$  мм (проекция непровара на хорду). Задача по определению остаточного НДС решалась методом конечных элементов. В программу вводили реальные значения погонной энергии сварки, замеренные в процессе экспериментов длину, ширину и глубину (по макрошлифу) сварочной ванны, а также механические свойства стали 20.

### Задачи исследования

В данном исследовании рассматривались такие задачи: 1) – решение методом конечных элементов (МКЭ) связанной температурной упруго-пластической задачи об остаточном НДС от сварки кольцевых швов паропроводов с заданным нормативно допустимым непроваром корня шва, в том числе и с последующим нагружением паропровода внешней осевой нагрузкой; 2) – анализ закономерностей и выявление возможных особенностей распределения НДС в расчетном сечении кольцевого шва; 3) – разработка алгоритма и выполнение расчета КИН в наиболее опасной точке фронта разрушения естественной полуэллиптической внутренней кольцевой поверхностной трещины в сварном шве; 4) – определение корректности применения силового критерия линейной механики разрушения к расчету КИН в рассматриваемой задаче; 5) – формулирование выводов относительно оценки статической прочности кольцевых стыков паропроводов с нормативно допустимым непроваром в корне шва.

### Основная часть

Принятая для анализа НДС прямоугольная система координат  $XYZ$  представлена на рис. 1, где показано продольное сечение стенки трубы по диаметру в месте искусственного непровара (кольцевой проточки). Ось  $Z$  перпендикулярна к плоскости рисунка. Штриховкой показана половина поперечного сечения кольцевого шва паропровода. Левая, симметричная относительно оси  $Y$ , часть продольного сечения стенки паропровода в зоне кольцевого шва на рис. 1 не показана.

**Анализ напряжений на линии шва, совпадающей с осью  $Y$ .** Распределение вдоль указанной линии осевых  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  и главных нормальных  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  напряжений для состояний паропровода после сварки, а также после дополнительного последующего нагружения осевым растяжением 100 МПа показаны на рис. 2.

Кривые на рис. 2 построены по результатам решения температурной упруго-пластической задачи и дальнейшей обработкой результатов в пакетах

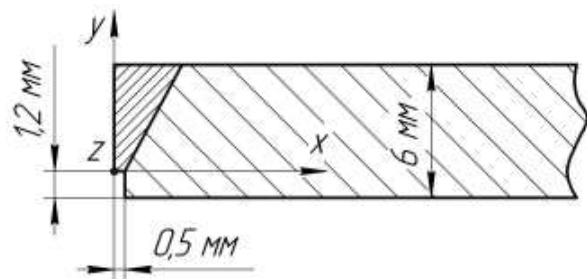


Рис. 1. Система координат  $XYZ$  для анализа НДС

Excel и MathCAD для получения полиномиальных зависимостей и построения графиков. Напряжения на рис. 2 представлены в мегапаскалях, координаты  $y$  – в миллиметрах. Обозначения напряжений: остаточные после сварки (метка – *res*) –  $\sigma_{k\_res}(y)$ , остаточные после сварки и дополнительного внешнего растяжения интенсивностью 100 МПа (метка – *load*) –  $\sigma_{k\_load}(y)$ , индекс  $k$  может принимать значения для осевых напряжений в системе координат  $XYZ$  –  $x, y, z$ , для главных нормальных напряжений – 1, 2, 3.

В выводах к данной работе отмечено ряд новых особенностей НДС в зоне сварного шва с допустимым согласно [1] непроваром при сварке кольцевых швов на паропроводах  $\varnothing 89 \times 6$  мм.

**Расчет коэффициентов интенсивности напряжений.** Возникающая в окрестности непровара корня шва плоская кольцевая трещина некоторой длины по окружности трубы относится к категории кольцевых поверхностных внутренних полуэллиптических плоских трещин [3]. Известно много работ [4, 6, 7] по расчету КИН для различных трещин в тонких и толстых пластинах, оболочках, деталях машин и др. Из трех возможных разновидностей КИН, а именно  $K_I, K_{II}, K_{III}$ , интерес представляет  $K_I$ , относящийся к трещинам нормального отрыва или, по-другому, трещинам I типа.

Для простых классических случаев сочетания трещин, конструктивных элементов и нагрузок, получены аналитические решения, позволяющие сравнительно просто вычислять КИН в зависимости от длины или глубины трещины.

В остальных случаях необходимо решать МКЭ сложные задачи механики разрушения. Проблема расчета КИН в общем случае связана с полным и корректным учетом граничных условий задачи. В ряде случаев для расчета КИН используют простые зависимости, полученные применительно к моделям тел для бесконечных областей с добавлением к ним в качестве множителей поправочных функций, учитывающих влияние на величину КИН граничных условий в реальных конструктивных элементах.

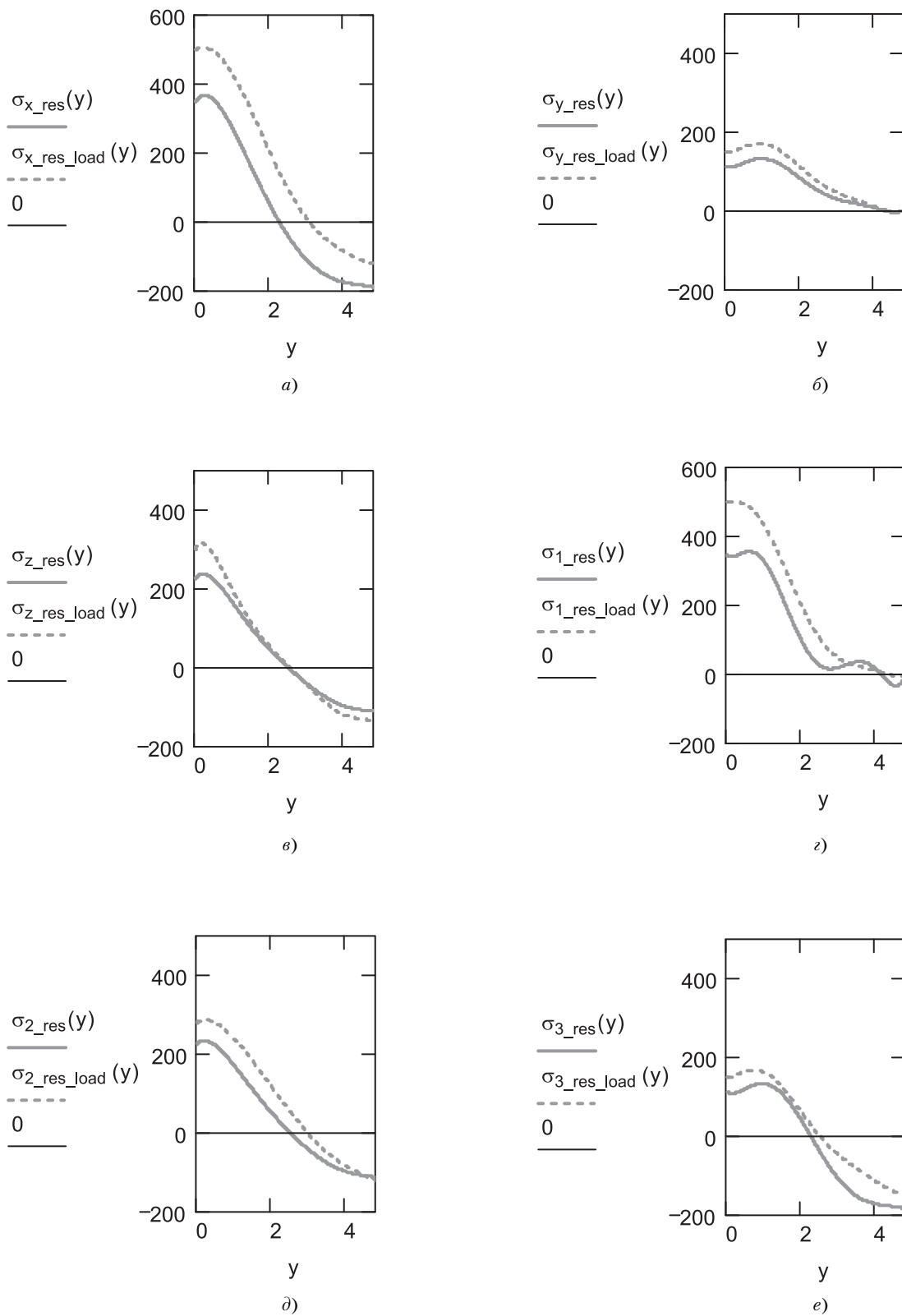
Такой подход основан на решении задач МКЭ, при этом поправочные функции должны давать приближенное решение для КИН с приемлемой для практики точностью.

Для определения КИН в данной работе можно было бы воспользоваться зависимостями, приведенными в документе [2]. Однако нам представляется недостаточно аргументированным применение для определения остаточных сварочных напряжений после релаксации зависимостей в виде

$$\sigma^{\text{ост}} = \sigma_1^{\text{ост}} (1 - 0,8\omega),$$

$$\sigma_1^{\text{ост}} = \psi \sigma_T,$$

где  $\sigma_1^{\text{ост}}$  – остаточные осевые сварочные напряжения после сварки до их изменения под действием внешнего нагружения,  $\sigma^{\text{ост}}$  – остаточные осевые свароч-



**Рис. 2.** Остаточные напряжения на средней линии шва:  
а), б), в) – осевые; г), д), е) – главные нормальные;  
сплошная кривая – после сварки; штриховая кривая – после сварки  
и продольного растяжения трубы (100 МПа)

ные напряжения после внешнего нагружения,  $\sigma_T$  – предел текучести,  $\omega = \sigma_n / \sigma_T$ ,  $\sigma_n$  – номинальные осевые напряжения в трубопроводе, (определяемые по зависимости Д.8.14 документа [2]),  $\psi$  – относительная интенсивность остаточных осевых сварочных напряжений после сварки. Остаточные сварочные напряжения после сварки  $\sigma_1^{ост}$  в условиях свободной реализации поперечной усадки металла шва и зоны пластических деформаций с двух боков шва по условию равновесия не могут быть распределены по поперечному сечению трубы равномерно, как это следует из упомянутых выше формул.

Кроме того, приведенная в документе [2] методика определения коэффициента  $\psi$  по графику на рис. Д.8.2 [2] является неверной. Полученные при ее применении результаты принципиально не соответствуют результатам компьютерного моделирования сварочного НДС на основе численного решения связанной температурной упруго-пластической задачи.

Другие положения документа [2], относящиеся к приведенным зависимостям из механики разрушения, особенно в части учета поправочных функций при расчете КИН, могут быть использованы, в том числе и для расчета КИН в технологических паропроводах применительно к внутренним поверхностным кольцевым полуэллиптическим трещинам, зарождающимся из «вершины» непровара в корне кольцевого шва.

В данной работе предлагается иной алгоритм расчета КИН в вершине кольцевой поверхностной внутренней полуэллиптической плоской трещины в паропроводе, возникающей от «вершины» непровара и распространяющейся в направлении внешней поверхности трубы в плоскости поперечного сечения паропровода посередине кольцевого шва. Алгоритм позволяет учесть неравномерность распределения расчетных напряжений по траектории распространения трещины.

В наиболее нагруженной и опасной точке фронта разрушения (на конце малой полуоси эллипса) суммарного дефекта-трещины будет возникать максимальное значение коэффициента  $K_{I\Sigma}(a)$ , обусловленное результирующими осевыми напряжениями от всей совокупности внешних осевых нагрузок с добавлением к ним остаточных сварочных напряжений, частично измененных от действия внешних осевых нагрузок.

Таким образом, исходя из принципа суперпозиции напряженных состояний в задачах о трещинах [4], принимаемого допущения о неизменности поля остаточных сварочных пластических деформаций в зоне кольцевого шва в процессе распространения кольцевой полуэллиптической трещины, а также рекомендаций [2] можно записать

$$K_{I\Sigma}(a) = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_0^a \sigma_{x\Sigma}(y) \sqrt{\frac{a+y}{a-y}} dy \cdot \Psi(a) \cdot F, \quad (1)$$

$$\Psi(a) = 1,12 + 3,25 \left(\frac{a}{\delta}\right)^2 - 2,34 \left(\frac{a}{\delta}\right)^4 + 0,9 \left(\frac{a}{\delta}\right)^6 - 1,322 \left(\frac{a}{\delta}\right)^8,$$

$$F = 1 + \left\{ 0,02 + \frac{2l}{\delta} \left[ 0,0103 + 0,00617 \left(\frac{2l}{\delta}\right) + 0,0035 \left\{ 1 + 0,7 \left(\frac{2l}{\delta}\right) \left(\frac{R}{\delta} - 5\right)^{0,7} \right\} \right] \right\},$$

где  $\sigma_{x\Sigma}(y) = \sigma x + p + \sigma_{x\_rel}(y)$  – максимальные суммарные осевые напряжения от внешних осевых нагрузок ( $\sigma x + p$ ) и измененных внешней нагрузкой осевых сварочных напряжений  $\sigma_{x\_rel}(y)$ ,  $\sigma x$  – максимальные номинальные осевые напряжения,  $p$  – внутренне давление в паропроводе;  $\delta$  – толщина стенки трубы,  $a$  – глубина естественной трещины,  $l$  – полудлина трещины,  $R$  – внутренний радиус трубы,  $F$  – поправка на геометрию трубы и трещины,  $\Psi(a)$  – поправка на тыльную свободную поверхность стенки трубы.

Для прямолинейных участков наземных трубопроводов при отсутствии поперечных перемещений трубопровода напряжения  $\sigma_x^+$  определяются согласно СНиП 2.05.06-85. Для паропровода максимальные допускаемые осевые напряжения в штатном режиме эксплуатации составляют 178,5 МПа [5].

В пакете MathCAD в системе координат XYZ по зависимости (1) с учетом приведенных ниже выражений (2) и (3) для осевых напряжений  $\sigma_x(y)$  соответственно в остаточном состоянии после сварки и после дополнительной внешней нагрузки выполнены расчеты ряда параметров  $K_I(a)$  для различных напряженных состояний в зоне сварного стыка паропровода.

$$\sigma_{x\_res}(y) = -0,2421y^6 + 4,2861y^5 - 34,272y^4 + 155,1y^3 - 356,12y^2 + 158,02y + 344,74; \quad (2)$$

$$\sigma_{x\_load}(y) = 0,4616y^6 - 6,897y^5 + 34,112y^4 - 42,666y^3 - 99,889y^2 + 45,724y + 497,71. \quad (3)$$

Сделано сопоставление расчетных значений  $K_I$  с допущим значением трещиностойкости  $K_{I\text{доп}}$  стали 20. В частности, определены значения  $K_{I-\sigma x-p}(a)$  от внешних нагрузок, значения  $K_{I-res}(a)$  от остаточных сварочных напряжений без приложения внешних нагрузок, суммарные значения  $K_{I\Sigma}(a)$  для состояния после сварки и приложенного внешнего нагружения величиной  $\sigma x + p = 100$  МПа, а также значения  $K_{I-\sigma x-rel}(a)$  для состояния после снятия внешней нагрузки (в измененном поле остаточных сварочных

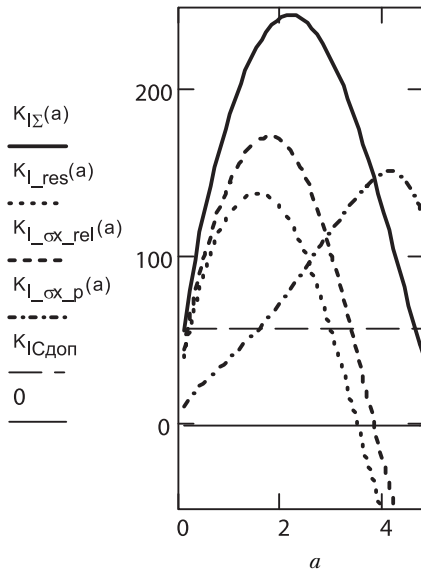


Рис. 3. Зависимость максимальных КИН от глубины трещины  $a$

напряжений). Расчеты выполнены при таких исходных данных:  $\sigma_x + p = 100$  МПа,  $0 \leq a \leq 4,8$  мм,  $R = 38,5$  мм,  $l = 30$  мм,  $\delta = 6$  мм, погонная энергия сварки  $q_n \approx 1$  кДж/мм,  $K_{ICдоп} = 57,817$  кГс  $\cdot$  мм<sup>-1.5</sup>. Результаты расчета показаны на рис. 3.

Из рисунка видно, что для двух кривых  $K_I$ , спадающая ветвь не пересекает горизонтальную линию допустимых значений трещиностойкости  $K_{ICдоп}$  стали 20. Это наиболее опасные варианты напряженного состояния паропровода в зоне непровара, при которых начавшая движение от непровара эллипсообразная трещина выйдет на внешнюю поверхность паропровода. Кривая  $K_{I_{\sigma_x p}}(a)$ , как показывает анализ, практически полностью определяется осевым растяжением паропровода от температурных перепадов воздуха, различными защемлениями трубы и изгибающими моментами, а не давлением пара  $p$  внутри паропровода. Кривая суммарных значений  $K_{I_{\Sigma}}(a)$  представляется наиболее опасной. Даже для более высоких, чем показано на рис. 3, допустимых значений трещиностойкости  $K_{ICдоп}$  будет место иметь прорастание трещины практически на всю толщину стенки паропровода.

Установлен ранее неизвестный эффект повышения остаточных сварочных напряжений  $\sigma_{x\_res\_rel}(y)$  после снятия внешней нагрузки по сравнению с состоянием после сварки, как это видно на рис. 4.

По нашему мнению этому явлению предварительно можно дать следующее объяснение.

При внешнем растяжении трубы вследствие уменьшения ее диаметра пропорционально коэффициенту Пуассона происходит пластическое укорочение металла шва в его корневой части над непроваром в окружном направлении с одновременным его

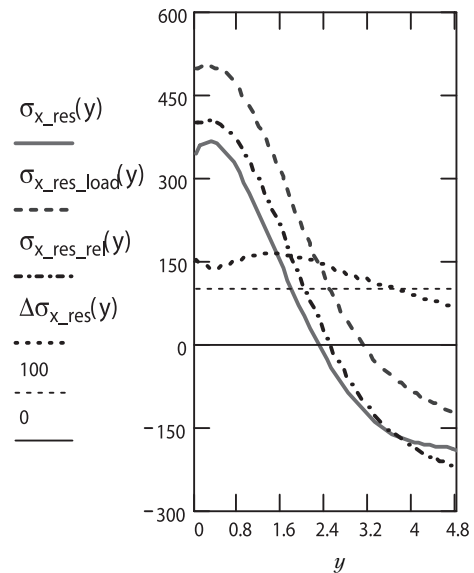


Рис. 4. Изменение осевых остаточных напряжений  $\sigma_{x\_res}$  в кольцевом шве при различных состояниях НДС трубы

удлинением в осевом направлении трубы. Об этом свидетельствуют изменения пластических деформаций в шве в указанных окружном и осевом направлениях (в работе не приведены). Вследствие окружного пластического укорочения в корне кольцевого шва при растяжении трубы возникают дополнительные необратимые перемещения зоны шва в радиальном направлении к оси трубы, увеличивается так называемая «корсетность» в области сварного шва и по этой причине происходит дополнительный изгиб стенки трубы по шву. Увеличение «корсетности» трубы в зоне шва после снятия внешнего осевого растяжения трубы способствует некоторому увеличению осевых остаточных сварочных напряжений  $\sigma_{x\_res\_rel}(y)$  над непроваром в корне шва вследствие изгиба стенки по шву из-за большей «корсетности».

Этот эффект возрастания остаточных сварочных напряжений в продольном направлении трубы в прикорневой части кольцевого шва после осевого внешнего растяжения и последующей разгрузки трубы установлен в данной работе впервые, как дополнительный силовой фактор он оказывает отрицательное влияние на статическую прочность паропроводов и в дальнейшем должен быть изучен более глубоко.

**Поправка Ирвина на пластичность у вершины трещины.** Важным в механике разрушения является вопрос о корректности применения того или иного критерия разрушения, в частности, силового критерия Ирвина, основанного на вычислении коэффициентов интенсивности напряжений. Идеальным является применение данного критерия для материалов, разрушающихся по чисто хрупкому, или хотя бы по квазихрупкому механизму, при котором протяжен-

ность зоны пластичности у вершины трещины незначительна по сравнению с длиной (в данном случае краевой трещины) или с полудлиной в случаях внутренней трещины в металле, не выходящей на поверхность. В этом случае наличием зоны пластичности можно пренебречь, поскольку процесс разрушения в полной мере будет определяться полем напряжений в окрестности вершины трещины. В иных случаях рекомендуется вычислять поправку Ирвина на пластичность [2] и учитывать ее при расчете КИН. Поправка Ирвина — это длина  $r_p$  пластической зоны перед вершиной трещины по траектории ее движения. Применение критерия Ирвина является корректным, если имеет место «маломасштабная пластичность» [8]. Рекомендуется  $r_p$  добавлять к длине трещины  $a$  и выполнять расчет КИН для скорректированной длины трещины  $(a+r_p)$ . Поправка Ирвина вычисляется по формулам:

при плоско напряженном состоянии

$$r_{p\_плс}(a) = \frac{K_I(a)^2}{2\pi\sigma_T^2}, \quad (4)$$

при плоско деформированном состоянии

$$r_{p\_плс}(a) = \frac{K_I(a)^2}{2\pi(3\sigma_T)^2} = \frac{K_I(a)^2}{18\pi\sigma_T^2}. \quad (5)$$

По умолчанию в формулах (4) и (5) под  $\sigma_T$  понимается нормативный предел текучести материала пластины с трещиной, определяемый по стандартной методике испытания образцов на одноосное растяжение.

Однако вершина будущей трещины может оказаться в некоторой области конструктивного элемента, в которой нормативный предел текучести  $\sigma_T$  на этапе изготовления или эксплуатации конструкции увеличился из-за упрочнения материала.

Обозначим коэффициент упрочнения  $k_h \geq 1$  (от англ. hardening — упрочнение). По траектории движения трещины  $k_h$  может изменяться и, следовательно, его можно представить как функцию глубины трещины  $a$  в виде  $k_h(a)$ . Тогда эффективный предел текучести

$$\sigma_{T\_eff}(a) = k_h(a)\sigma_T. \quad (6)$$

С учетом сказанного, формулы (4) и (5) перепишем в уточненном виде

$$r_{p\_плс}(a) = \frac{K_I(a)^2}{2\pi[\sigma_{T\_eff}(a)]^2} = \frac{K_I(a)^2}{2\pi[k_h(a)\sigma_T]^2}, \quad (7)$$

$$r_{p\_плс}(a) = \frac{K_I(a)^2}{2\pi[3\sigma_{T\_eff}(a)]^2} = \frac{K_I(a)^2}{2\pi[3k_h(a)\sigma_T]^2}. \quad (8)$$

В кольцевом шве паропровода над неповаром в стенке трубы и далее по ее толщине в направлении к внешней поверхности выполняются условия плоской деформации, за исключением приповерхностного слоя толщиной 1...2 мм, где металл шва находится в переходном состоянии от плоско деформированного до плоско напряженного. Поэтому для оценки поправки на пластичность и принятия решения о корректности применения силового критерия механики разрушения с целью оценки статической прочности кольцевых швов технологических паропроводов с нормативно допустимым неповаром в корне шва необходимо пользоваться зависимостью (8). Таким образом, окончательно для трещины, распространяющейся в первом случае в поле только остаточных сварочных напряжений и во втором случае в суммарном поле остаточных сварочных и добавленных к ним напряжений от осевого внешнего растяжения трубы, соответственно будем иметь такие зависимости для расчета поправки на пластичность:

$$r_{p\_res}(a) = \frac{K_I(a)^2}{2\pi[3k_{h\_res}(a)\sigma_T]^2}, \quad (9)$$

$$r_{p\_load}(a) = \frac{K_I(a)^2}{2\pi[3k_{h\_load}(a)\sigma_T]^2}. \quad (10)$$

Вывод об упрочнении металла (изотропном, кинематическом, смешанном и др.), при каких-либо воздействиях на него (сварка, внешние нагрузки и др.) можно сделать после этих воздействий на основании изменения интенсивности напряжений  $\sigma_i$  (но до разгрузки, чтобы не произошло уменьшение  $\sigma_i$ ). Если в результате указанных воздействий на металл в каких-либо точках, сечениях, объемах происходит увеличение  $\sigma_i$  свыше  $\sigma_T$ , это означает, что упрочнение металла имело место.

Посмотрим на распределение в пределах расчетного интервала  $0 \leq y \leq 4,8$  мм интенсивности напряжений по Мизесу  $\sigma_i$  для двух остаточных состояний: после сварки и после сварки с дополнительным осевым растяжением трубы напряжениями 100 МПа. Соответствующие кривые  $\sigma_{i\_res}(a)$  и  $\sigma_{i\_load}(a)$  в сравнении с нормативным пределом текучести показаны на рис. 5.

Из рисунка видно, что в состоянии после сварки на всем интервале  $0 \leq y \leq 4,8$  мм  $\sigma_i \leq \sigma_T$ . Следовательно, на стадии охлаждения после сварки в температурном интервале от 500 °С и ниже, когда  $\sigma_T$  уже достиг своего нормативного значения, упрочнение в процессе формирования сварочных напряжений отсутствовало. Изменение напряженного состояния в металле шва в этом температурном интервале происходило в сторону возрастания нагрузки, напряжения

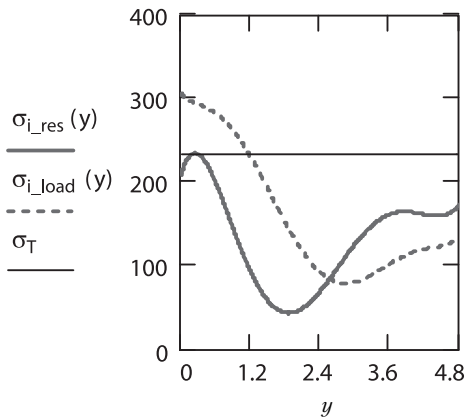


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i(y)$  для двух остаточных состояний — после сварки и после сварки с дополнительным осевым растяжением трубы

оставались меньше  $\sigma_T$ , процесс разгрузки отсутствовал. Поэтому коэффициент упрочнения  $K_{h\_res}(y)=1$ . В то же время, в остаточном состоянии после сварки на расчетном интервале имеем распределенную пластическую деформацию удлинения вдоль оси X (в работе не приведена). Понятно, что она образовалась на стадии охлаждения после сварки при значениях предела текучести гораздо меньших нормативного, соответствующих температурам выше  $500^\circ\text{C}$  вплоть до температуры кристаллизации сварочной ванны.

В остаточном состоянии после сварки с дополнительным осевым растяжением трубы, в пределах интервала  $0 \leq y \leq 1,17$ , как это видно на рис. 5 (штриховая кривая), имеет место изотропное упрочнение металла, которое учитывалось при расчете НДС. Коэффициент упрочнения металла на этом интервале  $K_{h\_load}(y) > 1$ , а на всем расчетном интервале  $0 \leq y \leq 4,8$  мм в среде MathCAD его можно представить следующей зависимостью

$$k_{h\_load}(y) = \begin{cases} \frac{\sigma_{i\_load}(y)}{\sigma_T} & \text{if } y \leq 1,17 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

Графики зависимостей коэффициентов упрочнения металла шва паропровода по линии движения вершины трещины показаны на рис. 6.

При  $a \geq 3,48$  значения  $K_{I\_res}(a) < 0$  (рис. 3) по причине преобладающего влияния сжимающих остаточных сварочных напряжений  $\sigma_{x\_res}(y)$  и поэтому зависимость для  $r_{p\_res}(a)$  необходимо в синтаксисе MathCAD записать в виде

$$r_{p\_res}(a) = \begin{cases} \frac{K_{I\_res}(a)^2}{18\pi(k_{h\_res}(a)\sigma_T)^2} & \text{if } a \leq 3,48 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

Для случая совместного действия остаточных сварочных напряжений и приложенного внешнего растяжения трубы

$$r_{p\_load}(a) := \frac{K_{I\Gamma}(a)^2}{18\pi(k_{h\_res\_load}(a)\sigma_T)^2} \quad (13)$$

Для нахождения относительной длины поправки  $\chi_p$  на пластичность необходимо вычисленные по зависимостям (12) и (13) значения поправки  $r_p(a)$  отнести к эффективной длине (глубине) трещины  $l_{eff} = h_{непр} + a$  ( $h_{непр} = 12$  мм)  $h$  — глубина допустимого непровара

$$\chi_{p\_res}(a) = \frac{r_{p\_res}(a)}{l_{eff}} \quad (14)$$

$$\chi_{p\_load}(a) = \frac{r_{p\_load}(a)}{l_{eff}} \quad (15)$$

Зависимости (14) и (15) для  $\chi_{p\_res}(a)$  и  $\chi_{p\_load}(a)$  показаны на рис. 7. По-видимому, целесообразнее определить на расчетном интервале средние значения относительных поправок  $\tilde{\chi}_{p\_res}(a)$  и  $\tilde{\chi}_{p\_load}(a)$

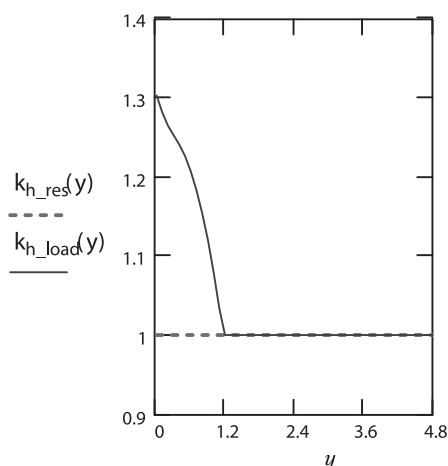
$$\tilde{\chi}_{p\_res\_av} = \frac{1}{h_{непр}} \int_0^a \frac{r_{p\_res}(a)}{h_{непр} + a} da \quad (16)$$

$$\tilde{\chi}_{p\_load} = \frac{1}{h_{непр}} \int_0^a \frac{r_{p\_load}(a)}{h_{непр} + a} da \quad (17)$$

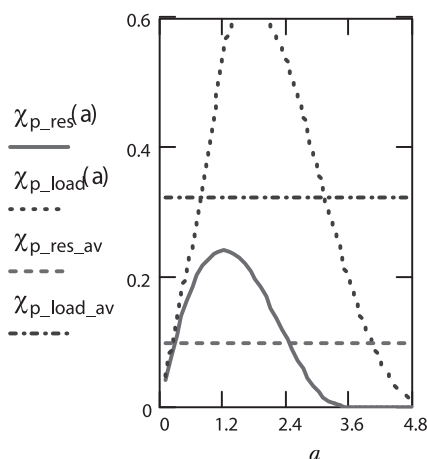
Вычисленные значения средних относительных поправок равны:  $\tilde{\chi}_{p\_res\_av} = 0,096$ ,  $\tilde{\chi}_{p\_load\_av} = 0,332$ . Как видим, средняя поправка для случая действия только остаточных сварочных напряжений вполне соответствует всем требованиям «ограниченной пластичности» [4, 8]. Что касается случая совместного действия остаточных сварочных напряжений и напряжений от внешнего растяжения трубы до уровня 100 МПа, то здесь средняя поправка заметно больше. Однако не следует забывать, что приведенный здесь анализ для поправок приближенный и точного решения задачи об НДС при плоскодеформированном состоянии в развитой пластической зоне, по-видимому, пока нет [9].

Таким образом, в целом можно сделать вывод о приемлемости и корректности использования силового критерия механики разрушения применительно к оценке статической прочности остроконечных внутренних кольцевых эллипсообразных трещин, инициированных в кольцевых швах нормативно допустимым непроваром корня шва и действующими эксплуатационными нагрузками и напряжениями от сварки с учетом их изменения под влиянием внешних нагрузок. В каждом конкретном случае необходимо решать задачу о напряжениях и затем по разра-





**Рис. 6.** Коэффициенты изотропного упрочнения вдоль линии движения вершины трещины для двух остаточных состояний — после сварки и после сварки с дополнительным осевым растяжением



**Рис. 7.** Относительная величина поправок на пластичность в зависимости от длины трещины

ботанному в работе алгоритму вычислять значения КИН вдоль траектории трещины.

### Выводы

1. Конечно-элементным методом получено решение и выполнен его анализ для связанной температурной упруго-пластической задачи при сварке кольцевых стыков технологических паропроводов  $\varnothing 89 \times 6$  мм из стали 20, в том числе с последующим внешним нагружением и разгрузкой.

2. Установлено, что, несмотря на относительно небольшую толщину стенки паропровода, область металла шва над непроваром находится в условиях весьма жесткого объемного растяжения с гидростатической составляющей тензора напряжений на уровне нормативного предела текучести.

3. Показано, что в сварном шве со стороны непровара формируется плоско деформированное напряженное состояние, постепенно переходящее в плоско напряженное по мере продвижения трещины к внешней поверхности трубы. В стенке трубы по толщине ближе к внешней поверхности осевая и окружная компоненты тензора напряжений являются сжимающими, направленными соответственно вдоль трубы и перпендикулярно к ее радиусу.

4. Наложение на поле остаточных сварочных напряжений внешнего осевого растяжения трубы величиной 100 МПа сдвигает осевую компоненту суммарных напряжений относительно равномерно по толщине трубы примерно на ту же величину 100 МПа. Другие компоненты напряжений изменяются незначительно. Такое распределение остаточных суммарных напряжений при внешнем растяжении свидетельствует о весьма слабом изменении при этом остаточных сварочных пластических деформаций в зоне сварного шва. Следовательно, в первом приближении можно допустить простое алгебраиче-

ское суммирование остаточных сварочных и внешне приложенных напряжений, по крайней мере, в осевом направлении (вдоль трубы).

5. Жесткое напряженное состояние в области металла шва над непроваром создает предпосылки для возможного зарождения в этой зоне шва естественной остроконечной трещины, которая в дальнейшем может распространяться по хрупкому механизму в направлении внешней стенки трубы. Для оценки такой возможности необходимо определять коэффициенты интенсивности напряжений.

6. Разработан алгоритм, методика и решена задача механики разрушения на основе силового критерия Ирвина при совместном действии внешних нагрузок и сварочных напряжений для внутренних кольцевых поверхностных трещин в швах паропроводов, инициированных максимальным нормативно допустимым непроваром в корне шва.

7. Установлен ранее неизвестный эффект повышения остаточных сварочных напряжений  $\sigma_{x, res}(y)$  после осевого нагружения паропровода до 100 МПа и снятия внешней нагрузки по сравнению с состоянием после сварки.

8. Установлено, что для принятой в работе допустимой трещиностойкости для стали 20 величиной  $57,817 \text{ кгс/мм}^{-1.5}$ , возникшая от непровара по каким-либо причинам естественная полуэллиптическая трещина будет распространяться малой полуосью вглубь толщины стенки примерно до 0,5...0,8 ее толщины в силовом поле только сварочных напряжений, а в совместном силовом поле внешних нагрузок и частично измененных внешней нагрузкой сварочных напряжений трещина практически выйдет на внешнюю поверхность паропровода.

9. Разработанные алгоритмы, методики и полученные конкретные результаты могут быть использованы для доработки и совершенствования нормативной документации, используемой при созда-



нии и эксплуатации технологических паропроводов на основе подходов линейной механики разрушения.

### Литература

1. *СНиП 3.05.05-84* «Технологическое оборудование и технологические трубопроводы».
2. *ВБН В.2.3-00018201.04-2000* «Расчеты на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами».
3. *Прохоренко В.М., Прохоренко О.В.* Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях. К.: НТУУ «КПІ», 2009. — 268 с.
4. *Брок Д.* Основы механики разрушения: пер. с англ. / Д. Брок. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
5. *РД10-400-01.* Тепловые сети.
6. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т. 1:* Пер. с англ./ Под ред. Ю. Мураками. — М.: Мир, 1990. — 448 с.
7. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т. 2:* Пер. с англ./ Под ред. Ю. Мураками. — М.: Мир, 1990. — 1016 с.
8. *Райс Дж.* Математические методы в механике разрушения / Разрушение (под ред. Г. Либовица). Т. 2. Математические основы теории разрушения. М.: Мир, 1975. С. 204–335.
9. *Астафьев В.И., Радаев Ю.Н., Степанова Л.В.* Нелинейная механика разрушения. — Самара: Издательство «Самарский университет», 2001. — 562 с.