

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭКСПЕРТИЗЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕФЕКТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. С. МИЛЕНИН¹, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО¹, Г. Ф. РОЗЫНКА¹, Н. И. ПИВТОРАК¹,
А. Н. ХИМИЧ², В. А. СИДОРУК²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины. 03187, г. Киев, просп. Академика Глушкова, 40.

E-mail: incyb@incyb.kiev.ua

Применительно к характерным задачам экспертизы работоспособности трубопроводных элементов с обнаруженными дефектами локальной коррозионно-эрозионной потери металла разработан комплекс моделей для оценки предельного состояния в условиях сложного температурно-силового эксплуатационного воздействия методом численного прогнозирования многомерного напряженно-деформированного состояния, докритического и критического повреждения материала конструкции с учетом различных механизмов деформирования при внешнем нагружении. Для программной реализации моделей было использовано конечно-элементное решение совместных задач кинетики состояния конкретного дефектного трубопровода посредством новых высокопроизводительных методов параллельного вычисления на основе многопроцессорных и гибридных компьютерных технологий. На примерах эксплуатационной поврежденности трубопроводных элементов магистральных и технологических систем исследованы особенности влияния локальных поверхностных потерь металла на развитие их докритической поврежденности, предельного состояния и работоспособности. Показано влияние дефекта локального утонения стенки различного размера на степень снижения статической прочности элемента магистрального трубопровода под действием внутреннего давления, а также дополнительного внешнего изгибающего момента. Также показано, что на эффективность конкретного алгоритма численных расчетов значительное влияние оказывает структура определяющей матрицы системы линейных уравнений. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: трубопроводный элемент, дефект несплошности металла, предельное состояние, работоспособность, численное прогнозирование, высокопроизводительные программные средства

Прогнозирование работоспособности ответственных конструктивных элементов, деталей машин и механизмов, в том числе оценка их фактического состояния, включает в себя комплекс технологических и аналитических процедур, таких как дефектоскопия, определение фактических свойств материала, прогнозирование напряженно-деформированного состояния, остаточного ресурса и проч. Часть такого экспертного анализа предполагает проведение численных исследований, направленных на минимально консервативное определение предельного состояния конструкции, для чего используются различные аналитические или численные подходы [1, 2]. Минимизация консервативности такого рода процедур возможна, в частности, с использованием современных средств компьютерного моделирования кинетики многомерных физических процессов, происходящих при производстве, монтаже, ремонте и эксплуатации рассматриваемой конструкции (детали), что позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать развитие докритического и критического повреждения ее материала, а также предельное состояние и работоспособ-

ность. Но для эффективного использования таких подходов, с одной стороны, необходимо построение достаточно сложных физических и математических моделей взаимосвязанных процессов и формальных критериев, адекватно описывающих развитие состояния конструкций при внешнем эксплуатационном воздействии. С другой стороны требуется реализация достаточно эффективных программных средств, позволяющих оперативно производить соответствующую обработку массивов данных инструментального контроля, численное прогнозирование и выполнение (или невыполнение) необходимых требований по остаточному ресурсу.

При проведении численных экспериментов в таких постановках, особенно, если речь идет о расчетах больших элементов конструкций (в том числе в реальном времени), требуется мелкая пространственная и временная детализация математических моделей. В результате этого формулируются расчетные задачи сверхбольшой размерности или с большим объемом данных, что предполагает высокие требования к вычислительным ресурсам компьютерной техники. Еще одним

фактором, также ресурсоемким, является обеспечение достоверности полученных численных решений, которая определяется как размерностью дискретных моделей, так и погрешностями исходных данных. Рассмотрение проблем математического моделирования в такой постановке из-за нехватки вычислительных ресурсов современных персональных компьютеров и рабочих станций требует перехода к новейшим компьютерным технологиям, то есть к использованию программно-технических комплексов с параллельной организацией вычислений. Дополнительной мотивацией создания прикладного программного обеспечения нового поколения является мировая тенденция к непрерывному развитию новых архитектур компьютеров, технических средств, системного программного обеспечения.

В рамках данной работы рассматривались характерные задачи анализа фактического состояния сварных трубопроводных элементов (ТЭ) с обнаруженными дефектами локального утонения стенки коррозионно-эрозионной природы, которые решались посредством высокоэффективных программных средств численного прогнозирования состояния такого рода конструкций в характерных условиях эксплуатации.

Так, к типичным задачам экспертного анализа состояния элементов магистральных трубопроводных систем, а также трубопроводов атомных и тепловых электростанций с обнаруженными в процессе дефектоскопии геометрическими аномалиями относятся:

- оценка остаточной несущей способности ТЭ с учетом расположения и размеров обнаруженного дефекта локального утонения;
- подтверждение работоспособности поврежденной конструкции в условиях статической и переменного статической нагрузки, а также высокотемпературной эксплуатации;
- вероятностная оценка склонности к разрушению в рамках комплекса процедур риск-анализа состояния производственных систем.

Для решения указанного спектра задач с минимальной консервативностью необходимо рассмотрение особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС) ТЭ с обнаруженной эксплуатационной дефектностью, а также процессов докритического и критического разрушения материала в условиях внешнего температурно-силового воздействия. В отсутствие острых концентраторов напряжений основным механизмом разрушения материалов трубопроводов и сосудов давления является вязкое разрушение, которое заключается в зарождении и развитии равномерно распределенной пористости [3]. Изменение несущего нетто-сечения конструкции с такой поврежденностью влияет как на распределение полей

напряжений и деформаций, так и на ее несущую способность ввиду увеличения истинных напряжений. Поэтому при построении методологии численного анализа необходимо учитывать взаимосвязанные процессы формирования НДС рассматриваемого ТЭ и полей докритического повреждения его материала (распределения объемной концентрации пор f) под действием эксплуатационных нагрузок. Кроме того, трубопроводы (как магистральные, так и технологические) в подавляющем большинстве случаев являются сварными и, в частности, характеризуются наличием областей монтажной сварки кольцевых соединений, которые не подвергаются послесварочной термической обработке и являются местами сложного остаточного НДС, что необходимо учитывать при оценке ресурса и работоспособности ТЭ в случае расположения обнаруженного дефекта локального утонения на периферии сварного шва.

Указанные выше особенности были учтены путем построения комплексной модели прогнозирования кинетики температурного поля при сварке, развития нелинейных упругопластических деформаций и напряжений совместно с микро- и макроскопическим разрушением по вязкому механизму. Так, для прогнозирования остаточного послесварочного НДС производилось моделирование температурного поля при монтажной сварке кольцевых швов. Предполагалось, что теплопередача в свариваемой конструкции определяется процессами кондуктивного теплопереноса, описание которых сводится к решению нестационарного уравнения теплопроводности [4]:

$$c\gamma(r, \beta, z, T) \frac{\partial T(r, \beta, z)}{\partial t} = \nabla [\lambda(r, \beta, z, T) \nabla T(r, \beta, z)], (1)$$

где T , $c\gamma$, λ – соответственно температура, объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала ТЭ в момент времени t в точке (r, β, z) в цилиндрической системе координат (рис. 1).

Неоднородное температурное поле, формирующееся в процессе сварки, вызывает неравномерное термомодеформирование металла и его пластическое течение, что определяет текущее и остаточное НДС в области сварки. При последующем нагружении происходит сложное взаимодействие остаточных и эксплуатационных напряжений, что вызывает дальнейшее развитие напряженного состояния, накопление пластических деформаций и сопутствующее им разрушение. Следует отметить, что в условиях высокотемпературной эксплуатации наряду с деформациями мгновенной пластичности могут развиваться необратимые деформации ползучести, которые в ряде случаев оказывают существенное влияние на длительную прочность и работоспособность ТЭ. Поэтому решение задачи численного прогнозиро-

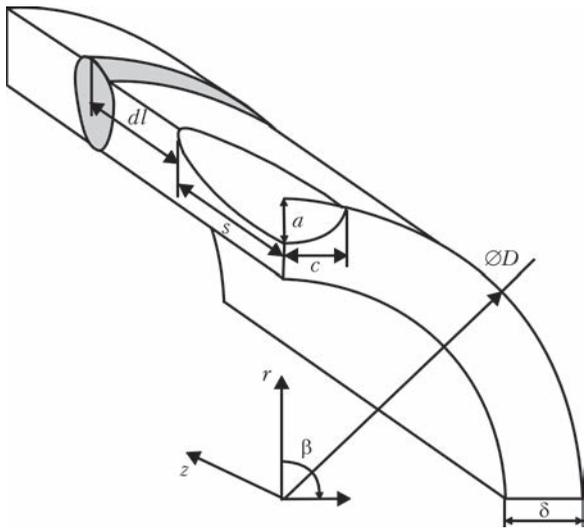


Рис. 1. Схема трубопроводного элемента с локальным дефектом потери металла в области кольцевого монтажного сварного шва

вания НДС трубопровода в условиях сварки и последующей эксплуатации при силовом или термосиловом воздействии требует учета совместного развития деформаций различной природы, а также пространственно распределенного несущего нетто-сечения конструкции, обусловленного докритическим разрушением материала по вязкому механизму.

В рамках разработанных при решении данной задачи моделей приращение компонент тензора деформаций принималось в виде суммы следующих составляющих:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + d\epsilon_{ij}^c + \delta_{ij} (d\epsilon_T + df/3), \quad (2)$$

где $d\epsilon_{ij}^e$, $d\epsilon_{ij}^p$, $d\epsilon_{ij}^c$, $\delta_{ij}d\epsilon_T$, $\delta_{ij}df/3$ – компоненты приращения тензора деформаций, которые обусловлены упругим механизмом деформирования, мгновенной пластичностью, ползучестью, термическим расширением и докритическим разрушением, δ_{ij} – символ Кронекера.

Условием пластического течения материала ТЭ с учетом возможности зарождения и развития равномерно распределенной пористости вязкого разрушения был выбран ассоциированный закон пластического течения модели Гурсона–Твергаарда–Нидлмана [5], условием локального зарождения вязкого разрушения в изначально неповрежденном материале принят модифицированный закон Джонсона–Кука [6], рост пористости определялся законом Райса–Трейси [7]. Предельное развитие пористости вязкого разрушения участка конструкции в конкретном напряженном состоянии может быть оценено посредством численного критерия хрупко-вязкого разрушения [8].

Решение совместной задачи напряженно-деформированного и поврежденного состояний материала ТЭ в условиях монтажной сварки и последующей эксплуатации было реализовано пу-

тем численного прослеживания деформаций термопластичности и ползучести в рамках конечно-элементной постановки. В этом случае приращение компонент тензора общих деформаций $\Delta\epsilon_{ij}$ в каждом конкретном конечном элементе может быть представлено следующим образом [9]:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_{ij} = & \left[\Psi + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) + \\ & + \delta_{ij} \left(K\sigma + \Delta\epsilon_T + \Delta f/3 \right) - \left[\frac{1}{2G} + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] \times \\ & \times (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; Ψ – функция состояния упруго-пластического материала, определяющая степень развития пластического течения; K – модуль объемного сжатия; G – модуль сдвига; символ «*» относит переменную или выражение к предыдущему шагу прослеживания; Ω – функция ползучести материала конструкции.

Решение задачи (3) характеризуется двумя нелинейностями, а именно по пластическому деформированию и по разрушению при статических и циклических нагрузках. Для решения данных нелинейных задач были использованы итерационные алгоритмы, приведенные, в частности, в работе [8].

Конечно-элементная задача (3) на каждом этапе прослеживания и итерирования сводится к поиску решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), что дает достаточно широкие возможности программной и аппаратной оптимизации расчетов с целью их ускорения. В частности, использование параллельных алгоритмов решения СЛАУ позволяет эффективно производить расчеты с помощью персональных компьютеров с многоядерными процессорами, а также на компьютерных комплексах кластерной или гибридной архитектуры. Для этого необходимо первоначально рассмотреть следующие вопросы:

- определить, для каких видов матриц СЛАУ эффективно использовать конкретный вид распараллеливания;

- распределить задачи на подзадачи (макрооперации) и выявить информационные зависимости между ними с целью эффективного распараллеливания на различных вычислительных устройствах (центральный CPU и/или графический GPU процессоры);

- учесть структуру, объем, быстродействие памяти вычислительных устройств для обеспечения высокой эффективности алгоритма;

- обеспечить равномерную загрузку (балансирование) вычислительных элементов.

Условная блок-схема решения СЛАУ в рамках численного анализа НДС и поврежденного состо-

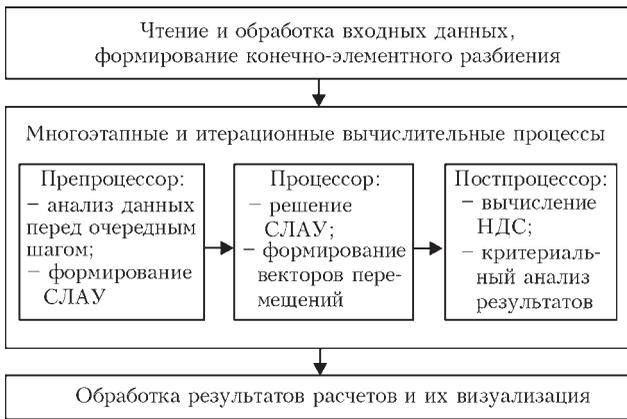


Рис. 2. Блок-схема алгоритма решения задачи численного прогнозирования напряженно-деформированного состояния трубопроводного элемента с учетом распараллеливания расчета на многопроцессорных компьютерных системах

яния ответственных ТЭ методами параллельных вычислений приведена на рис. 2. Программные алгоритмы такого расчета на компьютерах многопроцессорной, кластерной и гибридной архитектуры были реализованы в рамках программного пакета Weld Predictions, что позволило производить с его помощью исследования сложных многомерных физико-механических и технологических процессов, определяющих предельное состояние и работоспособность ответственных сварных конструкций с обнаруженными при дефектоскопии геометрическими аномалиями. В качестве примеров такого экспертного анализа с помощью разработанного программного обеспечения был рассмотрен ряд характерных случаев коррозионно-эрозионного повреждения сварных элементов магистральных и технологических трубопроводов, а именно: статическая прочность элемента магистрального трубопровода (МТ) диаметром $D = 1420$ мм и толщиной стенки $\delta = 20$ мм из стали 17Г1С под действием внутреннего давления и момента изгиба, а также элемента технологического трубопровода ($D = 300$ мм, $\delta = 15$ мм, сталь 15Х2МФА) в условиях высокотемпературной эксплуатации. В ряде случаев при анализе степени эксплуатационной коррозионной дефектности сварных конструкций целесообразно использование интегрального анализа текущего поля напряжений, в частности, путем оценки вероятности разрушения рассматриваемого конструкционного элемента. В ряде работ авторами изложен и обоснован метод расчета вероятности разрушения путем интегрирования поля главных напряжений σ_1 в рамках статистики Вейбулла, что фактически является реализацией механизма разрушения по принципу «слабого звена» [10]:

$$p = 1 - \exp \left[- \int_S \left(\frac{\sigma_1 - A}{B} \right)^m \frac{dS}{S_0} \right], (\sigma_1 > A), \quad (4)$$

где A, B, m – параметры Вейбулла, зависящие от характеристик прочности материала; S_0 – константа

материала, характеризующая пространственный масштаб перехода микроповреждений в макродефект.

Использование результатов численного моделирования остаточного послесварочного НДС и влияния силового нагружения на конструкцию с плавными концентраторами напряжений в области локальных коррозионно-эрозионных потерь металла для оценки склонности конструкции к макроразрушению на основе (4) позволяет учитывать при анализе все компоненты тензора напряжений, а также особенности их перераспределения в условиях эксплуатации. В качестве примера на рис. 3, а показано влияние ширины $2c$ дефекта утонения полуэллиптической формы (при фиксированных длине $2s = 100$ мм и глубине $a = 10$ мм) на вероятность разрушения участка МТ под действием внутреннего давления P . Как видно из приведенных результатов, влияние ширины дефекта на склонность рассматриваемого участка трубопровода невелико в рабочем диапазоне давлений (до 8 МПа), что соответствует практике эксплуатации МТ с дефектами локального утонения.

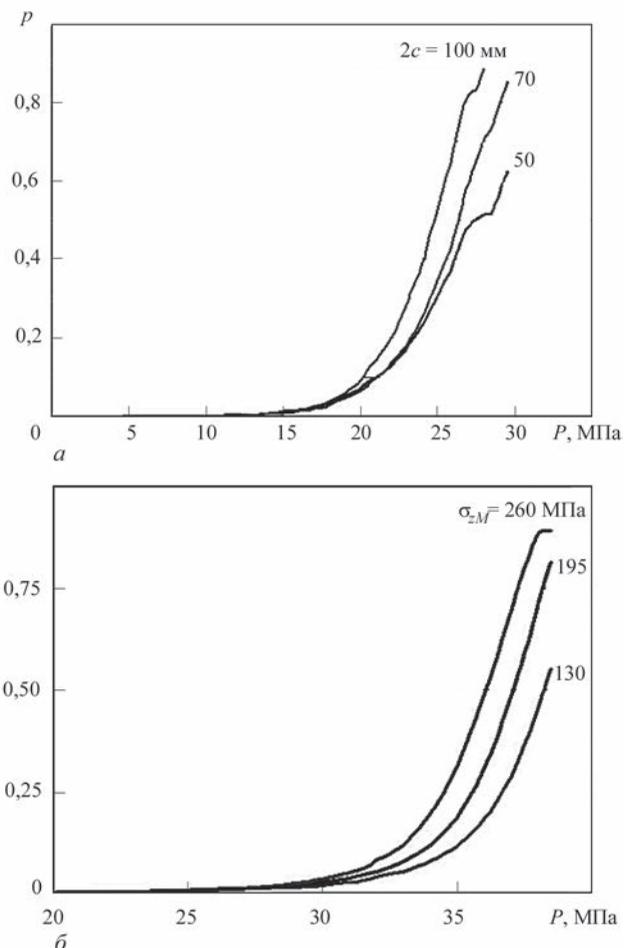


Рис. 3. Зависимости вероятности разрушения ТЭ p с внешним дефектом утонения от его ширины $2c$ ($a = 10$ мм, $2s = 100$ мм) (а) и от величины положительного момента изгиба σ_{zM} при различных внутренних давлениях P ($a = 9$ мм, $2s = 100$ мм, $2c = 80$ мм) (б)

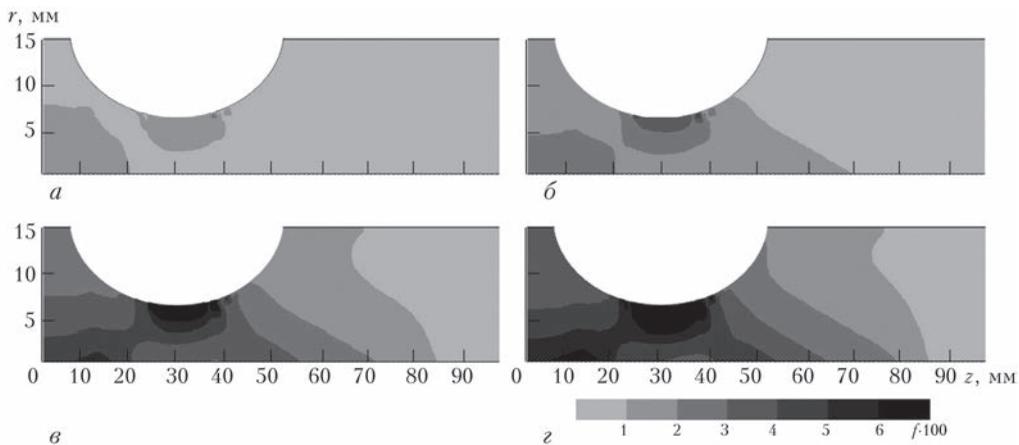


Рис. 4. Распределение докритического повреждения при высокотемпературной (650 °С) эксплуатации участка трубопровода ($D \times \delta = 300 \text{ мм} \times 15 \text{ мм}$, $P = 13 \text{ МПа}$) с наружным дефектом локального утонения на периферии сварного шва через различные промежутки времени: а – 400 ч; б – 800; в – 1200; з – 1480

Дополнительный момент изгиба, вызывающий избыточные продольные напряжения в области дефекта σ_{zMP} имеет следствием соответствующее снижение несущей способности дефектного участка МТ и нелинейный рост вероятности разрушения при различных внутренних давлениях (см. рис. 3, б). Как видно из приведенных данных, изменение величины момента изгиба при практически неизменных окружных напряжениях (фиксированном P), т. е. увеличение осевой компоненты тензора напряжений, может существенно снижать предельное давление в трубопроводе с дефектом утонения.

Зарождение и развитие докритического повреждения материала элемента технологического трубопровода в процессе эксплуатации при повышенных температурах определяется кинетикой совместного накопления необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести, особенно в области локального концентратора напряжений, которым в настоящей работе принят внешний дефект локального утонения стенки ($2c = 40 \text{ мм}$, $2s = 40 \text{ мм}$, $a = 5 \text{ мм}$). Как показали результаты расчетов (рис. 4), изменение распределения объемного содержания пор вязкого разрушения f во времени эксплуатации в основном определяется величиной накопленных деформаций ползучести, причем на ранних этапах характерными участками максимальных значений f являются области дефекта и кольцевого шва, а при приближении к предельному состоянию ТЭ формируется характерная объединенная зона повышенной докритической поврежденности металла, что создает предпосылки к зарождению макродефекта и разрушению конструкции. При этом, чем ближе дефект расположен к сварному шву, тем раньше по времени будет формироваться совместная область пластического деформирования и разрушения и тем сильнее наличие дефекта будет влиять на несущую способность ТЭ. Этот же эффект может проявляться в случае сложного нере-

гулярного внешнего воздействия, в частности, при переменных во времени температурах. Как показано на рис. 5, при уменьшении расстояния между дефектом и сварным швом dl при модельных условиях эксплуатации (эксплуатационное давление $P_0 = 10 \text{ МПа}$, средняя температура $T_0 = 650 \text{ °С}$, размах температур $dT = 50 \text{ °С}$, период $\tau = 3600 \text{ с}$) остаточный ресурс конструкции снижается более чем на 25 %.

Решение этих задач было проведено с использованием различных программных алгоритмов и компьютерных средств для оценки эффективности разработанных методов параллельного расчета при конечно-элементном прогнозировании развития состояния дефектного ТЭ. Так, в частности, задача анализа состояния технологического ТЭ характеризуется ленточной матрицей СЛАУ порядка 52500 с полушириной ленты 1052 и при этом использование последовательного алгоритма на обычном персональном компьютере потребовало 84 ч для проведения

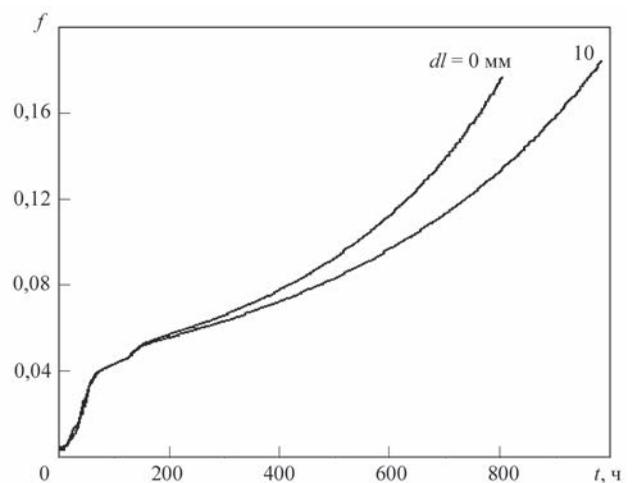


Рис. 5. Кинетика развития во времени t докритического разрушения трубопроводного элемента ($D \times \delta = 300 \text{ мм} \times 15 \text{ мм}$) с дефектом локального утонения ($a \times 2s = 7 \text{ мм} \times 50 \text{ мм}$) в условиях циклического изменения температуры эксплуатации ($P_0 = 10 \text{ МПа}$, $T_0 = 650 \text{ °С}$, $dT = 50 \text{ °С}$, $\tau = 3600 \text{ с}$) при различных расстояниях dl между дефектом и кольцевым швом

Таблица. Сравнение времени решения СЛАУ для характерной задачи экспертного анализа состояния трубопровода с обнаруженным дефектом локального утонения стенки при использовании различных алгоритмов реализации соответствующих математических моделей

Порядок СЛАУ	Полуширина ленты	Время решения одной СЛАУ (с) по различным алгоритмам		
		Последовательный	Параллельный	Гибридный
30912	337	6	0,75	1,50
52500	1052	210	14,28	2,93
55650	1052	170	7,08	3,96
117092	239	60	3,00	2,64
137826	4448	1500	302,70	49,00

расчета. Распараллеливание решения СЛАУ согласно блок-схемы, показанной на рис. 2, позволило сократить время расчета до 5 ч 42 мин, а подключение графического процессора в рамках гибридного алгоритма – до 1 ч 42 мин. Следует отметить, что эффективность конкретного алгоритма расчета определяется также структурой матрицы СЛАУ (порядком матрицы и полушириной ленты). Как показано в сравнительной таблице, уменьшение порядка матрицы и полуширины ее ленты (т. е. снижение дискретности пространственного разбиения конечно-элементной модели) снижает эффективность гибридного механизма расчета, что доказывает необходимость предварительного анализа особенностей конкретной задачи экспертизы дефектной конструкции при выборе наиболее эффективного алгоритма численного исследования.

Выводы

1. В рамках разработки нового поколения специализированного проблемно-ориентированного программного обеспечения для решения актуальных задач экспертизы состояния ответственных сварных конструкций с обнаруженными трехмерными дефектами был создан комплекс математических моделей и нового программного обеспечения на вычислительных средствах многоядерной и гибридной архитектур. Применительно к анализу работоспособности разработанные программы были интегрированы в расчетный комплекс Weld Predictions, что позволило в режиме реального времени проводить исследования кинетики полей температур, напряжений, деформаций, докритического и критического повреждения трубопроводных элементов и сосудов давления в условиях сложного внешнего эксплуатационного температурно-силового воздействия с учетом обнаруженных в процессе дефектоскопии локальных коррозионно-эрозионных потерь металла.

2. На характерных примерах эксплуатационной поврежденности трубопроводных элементов магистральных и технологических систем исследованы особенности влияния локальных поверхностных потерь металла на развитие их докритической поврежденности, предельного состояния и работо-

способности. Показано влияние дефекта локального утонения стенки различного размера на степень снижения статической прочности элемента магистрального трубопровода под действием внутреннего давления, а также дополнительного внешнего изгибающего момента. Кроме того, применительно к технологическому трубопроводу из стали 15Х2МФА исследованы характерные особенности влияния дефекта коррозионно-эрозионной потери металла на работоспособность в условиях высокотемпературной эксплуатации. Показано, что изменение распределения объемного содержания пор вязкого разрушения во времени определяется преимущественно величиной накопленных деформаций ползучести, причем если на ранних этапах характерными участками максимальных значений докритической поврежденности являются области дефекта и монтажного кольцевого шва, то при приближении к предельному состоянию трубопроводного элемента формируется характерная объединенная зона повышенной докритической поврежденности металла, что создает предпосылки к зарождению макродефекта и разрушению конструкции.

3. Показано, что эффективность конкретного алгоритма расчета определяется структурой матрицы СЛАУ. В частности, уменьшение порядка матрицы и полуширины ее ленты снижает эффективность гибридного механизма расчета, что доказывает необходимость предварительного анализа особенностей конкретной задачи экспертизы дефектной конструкции при выборе рационального алгоритма численного исследования.

Список литературы

1. Escoe A. K. (2006) Piping and pipelines. Assessment Guide. Texas, Gulf Professional Publishing.
2. Стрельникова Е. А., Ковч О. И. (2015) Исследование взаимного влияния пор в сварном шве под воздействием термосилового нагружения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 5, 59–63.
3. Lemaitre J., Desmorat R. (2005) *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. Berlin, Springer-Verlag.
4. Radaj D. (1992) *Heat Effects of Welding. Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Berlin, Springer Verlag.
5. Xue L. (2007) Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading. *Int. J. of Solids and Structures*, 44, 5163–5181.

6. Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф., Миленин А. С. и др. (2013) Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях. *Автоматическая сварка*, **9**, 26 – 31.
7. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. (1993) Физико-механическое моделирование процессов разрушения. Санкт-Петербург, Политехника.
8. Великоиваненко Е. А., Миленин А. С., Розынка Г. Ф. и др. (2016) Моделирование процессов зарождения и развития докритической поврежденности металла сварных трубопроводных элементов при малоцикловом нагружении. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 14–20.
9. Махненко В. И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
10. Миленин А. С., Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф. и др. (2014) Вероятностная оценка состояния трубопроводных элементов с обнаруженными дефектами утонения. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 12–18.

References

1. Escoe, A.K. (2006) *Piping and pipelines. Assessment guide*. Texas, Gulf Professional Publishing.
2. Strelnikova, E.A., Kovch, O.I. (2015) Examination of reciprocal influence of pores in weld under impact of thermal force load. *East-European J. of Advanced Technologies*, **5**, 59-63 [in Russian].
3. Lemaitre, J., Desmorat, R. (2005) *Engineering damage mechanics. Ductile, creep, fatigue and brittle failures*. Berlin, Springer-Verlag.
4. Radaj, D. (1992) *Heat effects of welding. Temperature field, residual stress, distortion*. Berlin, Springer-Verlag.
5. Xue, L. (2007) Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading. *Int. J. of Solids and Structures*, **44**, 5163-5181.
6. Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Milenin, A.S. et al. (2013) Modelling of processes of nucleation and development of ductile fracture pores in welded structures. *The Paton Welding J.*, **9**, 24-29.
7. Karzov, G.P., Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A. (1993) *Physical-mechanical modeling of fracture processes*. St.-Petersburg, Politekhnikha [in Russian].
8. Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Pozyinka, G.F. et al. (2016) Simulation of processes of initiation and propagation of subcritical damage of metal in welded pipeline elements at low-cycle loading. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 14-20 [in Russian].
9. Makhnenko, V.I. (2006) *Resource of safety operation of welded joints and components of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
10. Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Milenin, A.S. et al. (2014) Probabilistic estimate of the condition of pipeline elements with detected thinning defects. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 12-18 [in Russian].

ВИСОКОПРОДУКТИВНІ МЕТОДИ ЧИСЕЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ЕКСПЕРТИЗИ РОБОТОЗДАТНОСТІ ДЕФЕКТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

О. С. МІЛЕНІН¹, О. А. ВЕЛИКОІВАНЕНКО¹, Г. П. РОЗИНКА¹, Н. І. ПІВТОРАК¹, О. М. ХІМІЧ², В. А. СИДОРУК²

¹Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України.

03187, г. Київ, прос. Академіка Глушкова, 40.

E-mail: incyb@icyb.kiev.ua

Стосовно до характерних задач експертизи роботоздатності тру-

бопровідних елементів з виявленими дефектами локальної корозійно-ерозійної втрати металу розроблено комплекс моделей для оцінки граничного стану в умовах складного температурно-силового експлуатаційного впливу методом чисельного прогнозування багатовимірного напружено-деформованого стану, докритичного і критичного пошкодження матеріалу конструкції з урахуванням різних механізмів деформування при зовнішньому навантаженні. Для програмної реалізації моделей було використано скінченно-елементне розв'язання спільних задач кінетики стану конкретного дефектного трубопроводу за допомогою нових високопродуктивних методів паралельного обчислення на основі багатопроцесорних і гібридних комп'ютерних технологій. На прикладах трубопровідних елементів магістральних і технологічних систем досліджені особливості впливу локальних поверхневих втрат металу на розвиток їх докритичного пошкодження, граничного стану і роботоздатності. Показано вплив дефекту локального стоншування стінки різного розміру на ступінь зниження статичної міцності елемента магістрального трубопроводу під дією внутрішнього тиску, а також додаткового зовнішнього моменту згину. Також показано, що на ефективність проведення чисельних розрахунків конкретного алгоритму значний вплив має структура визначальної матриці системи лінійних рівнянь. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: трубопровідний елемент, дефект несучільності металу, граничний стан, роботоздатність, чисельне прогнозування, високопродуктивні програмні засоби

HIGH-PERFORMANCE METHODS OF NUMERICAL STUDIES FOR SOLVING THE PROBLEMS OF EVALUATION OF DEFECTIVE STRUCTURE SERVICEABILITY

A.S.MILENIN¹, E.A.VELIKOIVANENKO¹, G.F.ROZYINKA¹, N.I.PIVTORAK¹, A.N.KHINICH², V.A.SIDORUK²

¹E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine 11 Kazimir Malevich str., 03150, Kiev.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²V.M.Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, 40 Akad. Glushkov prosp., 03187, Kiev.

E-mail: incyb@icyb.kiev.ua

A set of models was developed for assessment of the limit state under the conditions of complex temperature-force service impact by the method of numerical prediction of multidimensional stress-strain state, subcritical and critical damage of structure materials, allowing for different deformation mechanisms at external loading for the case of characteristic problems of evaluation of serviceability of pipeline elements with detected defects of local corrosion-erosion metal loss. Software implementation of the model was performed by applying finite-element solution of joint problems of kinetics of the state of a specific defective pipeline by applying new high-efficient methods of parallel computation, based on multiprocessor and hybrid computer technologies. Features of the influence of local surface losses of metal on development of their subcritical damage, limit state and serviceability, were studied in the cases of service-induced damage of pipeline elements of the main and process systems. It is also shown that the efficiency of a specific algorithm of numerical calculations is significantly affected by the structure of the defining matrix of the system of linear equations. 10 References, Table 1, Fig. 9.

Keywords: acoustic emission, 103-D reactor, propagating defects, continuous monitoring, residual life

Поступила в редакцію 10.01.2018