



УДК 621.91:621.642.02

УЧЕТ ПОРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ ДЕФЕКТА УТОНЕНИЯ СТЕНКИ СОСУДА ДАВЛЕНИЯ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,
Г. Ф. РОЗЫНКА, **Н. И. ПИВТОРАК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Модели вязкого разрушения с учетом образования пор при пластическом течении на неметаллических включениях либо в матрице из микротрещин, не распространяющихся по механизму скола, предусматривают соответствующие алгоритмы роста пор за счет пластических деформаций и соответствующего перераспределения напряженно-деформированного состояния. В настоящее время интерес к этим моделям повысился в связи с ростом объемов прогнозных и экспертных оценок для сварных конструкций на основе расчетных оценок предельного состояния. В целом ряде случаев, учитывая тенденцию использования в сварных конструкциях высокопрочных и достаточно пластичных материалов, предельное состояние наступает в условиях вязкого деформирования при жестком напряженном состоянии, способствующих развитию порообразования. В результате разрушение происходит при относительно невысоких пластических деформациях, что резко снижает деформационную способность соответствующих сварных узлов перед разрушением.

Ключевые слова: стальные сосуды давления, развитие пластического течения, предельное состояние, порообразование, зона разрушения, критерии разрушения при наличии пор, спонтанное разрушение

Эксплуатационные дефекты утонения стенок современных сварных сосудов давления являются наиболее распространенными выявляемыми дефектами конструкций длительного срока эксплуатации (магистральные трубопроводы, хранилища нефти и газа, железнодорожные цистерны и т. п.). Выявленные дефекты при периодических технических диагностиках таких конструкций оценивают с позиций безопасной эксплуатации конструкций на период, по крайней мере, до следующей технической диагностики. При этом руководствуются определенными правилами, основанными на соответствующих расчетных и экспериментальных исследованиях. Эти правила совершенствуются по мере накопления фактического материала их использования, изменения условий эксплуатации конкретных типов конструкций, совершенствования расчетных моделей нагружения (разрушения), а также методов реализации этих моделей.

Следует отметить, что наблюдаемый весьма существенный прогресс в вычислительной технике и соответственно механике деформирования и разрушения конструкционных материалов, который способствует реализации все более сложных физических моделей, является хорошей основой для разработки более детальных моделей поведения конструкционных материалов как при деформировании (на этапе, близком к разрушению), так и в определенной степени при разрушении. Это делает расчетные подходы прогно-

зирования наступления предельного состояния в сложных случаях деформирования достаточно адекватными наблюдаемому при эксперименте, что позволяет снизить объем дорогостоящих экспериментов. Такой подход связан с привлечением дополнительных физических и математических моделей поведения материала для генерирования информации, связанной с наступлением предельного состояния. Работа в этом направлении активно ведется в различных странах. Из современных исследований особое внимание заслуживают работы сотрудников сибирской школы профессора В. Е. Панина в рамках нового научного направления — физической мезомеханики материалов [1]. В рамках этого направления рассматривается деформирование материалов на мезоуровне, т. е. с учетом существенной физической неоднородности, обусловленной наличием различных границ раздела (например, границ зерен) с последующей оценкой реакции материала на макроуровне через осреднение характеристик напряженно-деформированного состояния по представительному мезообъему. Элементарным актом неупругого поведения материала согласно [1] является «сдвиг + поворот», что позволяет сохранить условие неразрывности вплоть до разрушения, которое является конечной стадией фрагментации материала на макроуровне, когда происходит глобальная потеря сдвиговой устойчивости.

Важной стадией в деформировании материала на этапе перед разрушением является во многих случаях зарождение пор. Поры образуются при пластическом течении на неметаллических включениях либо в матрице из микротрещин, не рас-



пространяющихся по механизму скола, т. е. являющихся почти неотъемлемым атрибутом вязкого разрушения материала. Неудивительно, что вопросу образования и росту пор при вязком разрушении материалов уделяется достаточно большое внимание [2–4]. Начальные размеры возникающих пор обычно невелики — около 1 мкм, т. е. их влияние на деформационные процессы и разрушение вполне можно учитывать в рамках моделей мезоуровня, т. е. соответствующей неоднородностью свойств материала в объемах пор и вне этих объемов.

Ниже приведены результаты, полученные при следующих допущениях.

Поры зарождаются в изотермических условиях в произвольном конечном элементе (структурном объеме), если интенсивность пластической деформации ε_i^p больше определенной величины $(\varepsilon_i^p)_H$ и они равномерно распределены по объему элемента, т. е. концентрация пор на единице объема элемента

$$\rho_V = \frac{V_{\Pi}}{V_{K.Э}} \text{ при } \varepsilon_i^p \geq (\varepsilon_i^p)_H, \\ \rho_V = 0 \text{ при } \varepsilon_i^p < (\varepsilon_i^p)_H, \quad (1)$$

где V_{Π} — объем пор; $V_{K.Э}$ — объем элемента без пор.

Вводится понятие концентрации пор на единице площади сечения элемента (то, что можно наблюдать в изломе образца) — ρ_S . По аналогии с (1)

$$\rho_S = \frac{S_{\Pi}}{S_{K.Э}} > 0 \text{ при } \varepsilon_i^p \geq (\varepsilon_i^p)_H, \\ \rho_S = 0 \text{ при } \varepsilon_i^p < (\varepsilon_i^p)_H, \quad (2)$$

где S_{Π} — площадь пор в данном сечении величиной $S_{K.Э}$.

Соответственно на единице линейного размера $l_{K.Э}$ суммарная длина пор l_{Π} . Тогда

$$\rho_l = \frac{l_{\Pi}}{l_{K.Э}}. \quad (3)$$

Связь между ρ_V и ρ_l :

$$\rho_V = (1 + \rho_l)^3 - 1 = 3\rho_l \left(1 + \rho_l + \frac{1}{3}\rho_l^2\right) \approx 3\rho_l. \quad (4)$$

Соответственно $\rho_S = 2\rho_l \left(1 + \frac{1}{2}\rho_l\right) \approx 2\rho_l$.

Линейные размеры пор растут при развитии пластическом течении согласно закону Райса–Трейси [4] при $\varepsilon_i^p \geq (\varepsilon_i^p)_H$.

При допущении, что количество пор в данном структурном объеме меняется мало, но растет их размер

$$\frac{dl}{d\varepsilon_i^p} = 0,28l \exp \left(1,5 \frac{\sigma_m}{\sigma_i} \right), \quad (5)$$

где σ_m/σ_i — жесткость напряженного состояния;

$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{rr} + \sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz})$ — среднее нормальное напряжение в системе координат r, β, z ; σ_i — интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{rr} - \sigma_{\beta\beta})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{\beta\beta} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{rz}^2 + \sigma_{r\beta}^2 + \sigma_{\beta z}^2)]^{1/2}; \quad (6)$$

$d\varepsilon_i^p$ — интенсивность приращений пластических деформаций

$$d\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} [(d\varepsilon_{rr}^p - d\varepsilon_{\beta\beta}^p)^2 + (d\varepsilon_{rr}^p - d\varepsilon_{zz}^p)^2 + (d\varepsilon_{\beta\beta}^p - d\varepsilon_{zz}^p)^2 + 6(d\varepsilon_{r\beta}^p)^2 + 6(d\varepsilon_{rz}^p)^2 + 6(d\varepsilon_{\beta z}^p)^2]^{1/2}.$$

При указанном выше допущении, что количество пор в данном объеме V_0 меняется незначительно, изменение величины ρ_l соответствует относительному изменению линейных размеров за счет пористости.

Соответственно уравнения связи тензора деформаций $d\varepsilon_{ij}$ и тензора напряжений σ_{ij} при $i, j = r, z, \beta$ с учетом, что линейное удлинение равно ρ_l , можно записать следующим образом:

$$d\varepsilon_{ij} = d \left(\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m}{2G} \right) + d\lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m) + \delta_{ij} [d(K\sigma_m) + d\rho_l], \quad (7)$$

где ρ_l — решение уравнения (5) при $l = \rho_l$ и начальном значении ρ_l по (1), (4); $G = E/(2(1 + \nu))$; $K = (1 - 2\nu)/E$; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$.

При последовательном прослеживании развития пластических деформаций и начальном значении $\rho_V^{\text{нач}}$ в момент $k = 0$ по (1), полагая, что на протяжении между k -м и $k+1$ -м шагами прослеживания величина $d\varepsilon_i^p$ меняется незначительно, решение уравнения (5) относительно величины ρ_l дает

$$\ln \frac{\rho_l^{(k+1)}}{\rho_l^{(k)}} = 0,28 \exp \left(1,5 \frac{\sigma_m^{(k)}}{\sigma_i^{(k)}} \right) (\Delta\varepsilon_i^p)^{(k)}. \quad (8)$$



При величинах отношения $x = \frac{\rho_l^{(k+1)}}{\rho_l^{(k)}}$, близких к единице, раскладывая $\ln x$ в степенной ряд

$$\ln x = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x-1}{x+1} \right)^n \frac{1}{n} \quad (9)$$

и ограничившись членом $n = 1$, получим

$$\rho_l^{(k+1)} = \frac{(2 + A_k) \rho_l^{(k)}}{2 - A_k}, \text{ где } A_k = 0,28 \exp \left(1,5 \frac{\sigma_m^{(k)}}{\sigma_i^{(k)}} \right) (\Delta \varepsilon_i^p)^{(k)}, \quad (10)$$

начиная с $k = 0$, для которого $\rho_l^{(0)}$ определяется условиями (4).

Зная $\rho_l^{(k)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), находим для (7) приращение относительного удлинения линейных размеров данного конечного элемента за счет пористости

$$\Delta \rho_l^{(k+1)} = \rho_l^{(k+1)} - \rho_l^{(k)} = \rho_l^{(k)} \frac{A_k}{1 - 0,5A_k} \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (11)$$

Из изложенного выше следует, что учет пористости в определенной степени влияет на поля напряжений и деформаций за счет дополнительных объемных изменений — величины $\Delta \rho_l^{(k+1)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), подобным таковым при температурном расширении $\Delta \varphi$ [5].

Кроме того, при реализации условий текучести и критериев предельного состояния необходимо учитывать нетто-напряжения в сечениях конечных элементов, т. е. величины $\sigma_{ij}^{(k)}$ из решения соответствующей краевой задачи приводить к нетто-напряжениям $(\sigma_{ij}^{\text{нетто}})^{(k)} = \frac{\sigma_{ij}^{(k)}}{1 - \rho_s^{(k)}}$.

В качестве локальных критериев предельного состояния хрупковязкого разрушения в объеме данного конечного элемента используют согласно [2]

$$\begin{aligned} \sigma_1 > S_k & \text{ — хрупкое разрушение;} \\ \kappa_k > \varepsilon_{\text{кр}}^{(k)} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_i} \right) & \text{ — вязкое разрушение,} \end{aligned} \quad (12)$$

где σ_1 — максимальное главное нетто-напряжение; $\kappa_k = \int d\varepsilon_i^p = \sum_k (d\varepsilon_i^p)^{(k)}$ — параметр деформационного упрочнения Одвишта; $\varepsilon_{\text{кр}}^{(k)}$ — критическое значение κ_k на k -м шаге прослеживания в зависимости от жесткости напряженного состояния.

Например, по Маккензи [2]

$$\varepsilon_{\text{кр}}^{(k)} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_i} \right) > \varepsilon_0 + a \exp \left(-1,5 \frac{\sigma_m^{(k)}}{\sigma_i^{(k)}} \right), \quad (13)$$

где ε_0 и a — экспериментальные характеристики материала (для корпусных сталей $\varepsilon_0 = 0,07$, $a = 2,99$).

В случае резкого изменения при прослеживании величины $(\sigma_m/\sigma_i)^{(k)}$ и соответственно $\varepsilon_{\text{кр}}^{(k)}$ согласно [2] можно использовать метод накопления вязких разрушений в объеме данного элемента в виде

$$\sum_{k=0}^{k_{\text{кр}}} \left(\frac{\Delta \varepsilon_i^p}{\kappa} \right)_k = 1, \quad (14)$$

где $k_{\text{кр}}$ — предельное значение шага прослеживания, при котором данный конечный элемент «теряет работоспособность», т. е. его механические свойства резко меняются на свойства воздуха либо соответствующей агрессивной жидкости (при наличии соответствующего доступа).

Поскольку такое замещение свойств приводит к перераспределению нагрузок в соседних конечных элементах, то эта операция на данном шаге прослеживания по нагрузке выполняется итерационно при неизменной внешней нагрузке. При этом вполне естественным является случай, когда операция замещения в данном конечном элементе приводит на следующей итерации к замещениям в соседних элементах вплоть до «спонтанного разрушения» (когда операция замещения охватывает при данной нагрузке большой объем рассматриваемой конструкции). Соответственные условия наступления такого состояния рассматриваются

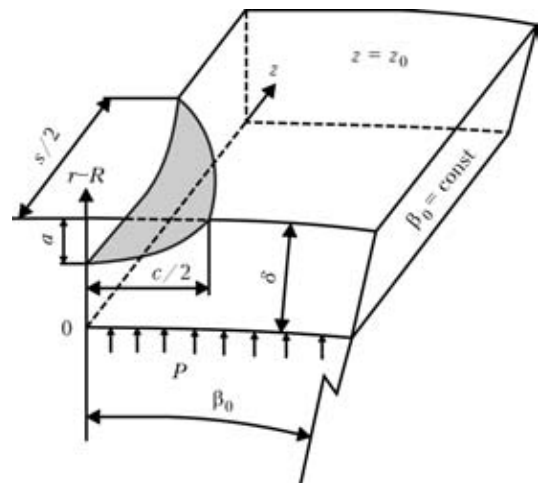


Рис. 1. Схема фрагмента оболочки трубы с дефектом утонения, нагруженного внутренним давлением P на поверхности $r - R = 0$ и номинальными напряжениями $\sigma_{\beta\beta}$, σ_{zz} в плоскости $\beta = \beta_0$ и σ_{zz} , σ_{zr} в плоскости $z = z_0$ и условиями симметрии $\beta = 0, z = 0$

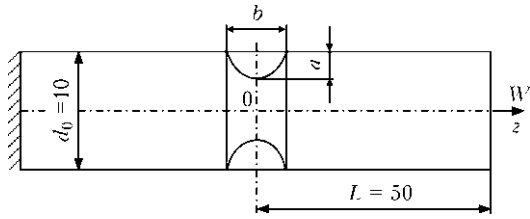


Рис. 2. Схема цилиндрического образца с осесимметричным надрезом размерами $a \times b$

как макроусловия наступления предельного состояния.

Изложенный подход предстоит применить к стальному сосуду давления с габаритными размерами дефекта $s \times c \times a$ (рис. 1), где s — размер вдоль образующей; c — вдоль окружности; a — в глубину стенки, в которой обнаружено утонение. Известны упругие характеристики стали E , ν , предел текучести σ_T и показатель степенного деформационного упрочнения m .

В условиях трехосного напряженного состояния с внутренним давлением P необходимо оценить предельное давление $P_{пр}$, при котором про-

Таблица 1. Варианты исходных данных, ответственных за порообразование

Номер варианта	σ_T , МПа	ρ_V	S_k , МПа	m
1	480	0,07	1000	0,14
2	480	0,05	1000	0,14
3	480	0,03	1000	0,14
4	480	0	1000	0,14
5	400	0,05	1000	0,14
6	300	0,05	1000	0,14
7	480	0,05	1000	0,05
8	480	0,05	1000	0,25
9	480	0,05	700	0,14
10	480	0,05	1500	0,14
11	480	0,05	1000	0,14

Примечание: $(\varepsilon_i^p)_0 = 0,01$.

изойдет макроскопическое спонтанное разрушение стенки в зоне утонения.

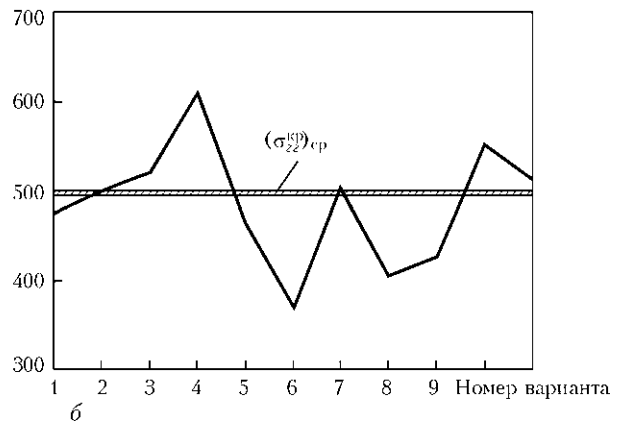
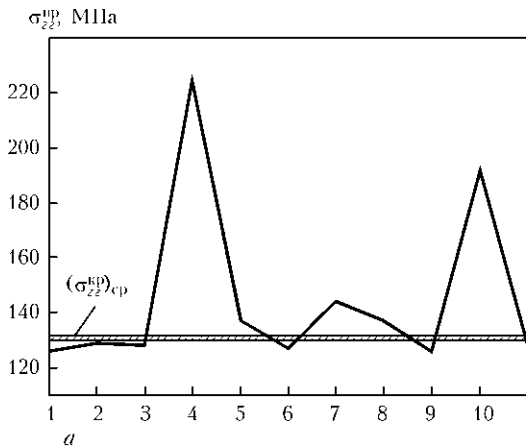


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования номинальных предельных напряжений σ_{zz}^{np} в сечении $z = L$ и спонтанного разрушения в сечении $z = 0$ образца с надрезом размерами $a \times b = 3 \times 1$ (а) и $a \times b = 1 \times 3$ мм (б) ($\alpha_z = 3,45$) для различных вариантов изменения σ_T , ρ_V , S_k , m (табл. 1) в сопоставлении с экспериментальными значениями $(\sigma_{zz}^{kp})_{cp}$. Варианты № 1–10: при $z = L$ задана величина σ_{zz}^{np} для варианта № 11 на каждом шаге задано приращение $\Delta W = 0,00261$ мм

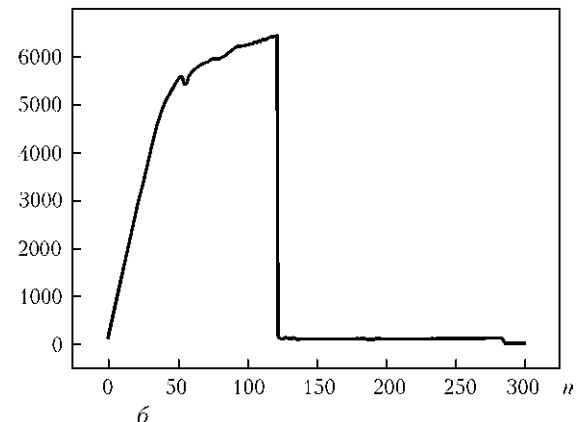
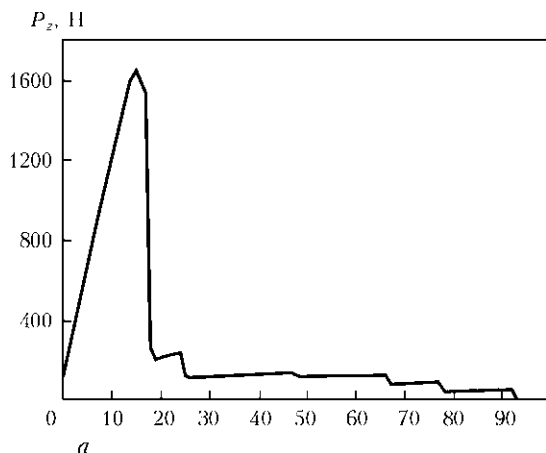


Рис. 4. Результаты моделирования усилия P_z на кромке $z = L = 50$ мм для образца с надрезом размерами $a \times b = 3 \times 1$ (а) и $a \times b = 1 \times 3$ мм (б) в зависимости от шага n при $\Delta W = 0,00261$ мм



Таблица 2. Исходные и расчетные данные для рассматриваемых дефектов утонения стенки ($c = 40$ мм; $a = 14$ мм)

Номер варианта	s , мм	$[P]$, МПа	P_{np} , МПа	n_b
1	66	7,5	18,8	2,5
2	100	5,15	17,4	3,3
3	200	4,15	14,0	3,2

В работе [6] представлен алгоритм численного определения в рамках 3D напряженно-деформированного состояния в зоне рассматриваемого дефекта без учета пористости. Последняя учитывалась в данной работе с помощью уравнений (1)–(14).

Необходимые данные для такой модели, связанные с конкретной сталью, предлагается определять с помощью простых опытов на растяжение цилиндрических образцов с осесимметричным

надрезом (см. рис. 2) из трубной стали с пределом текучести $\sigma_T \approx 480$ МПа. Рассматривали два размера надреза в образцах диаметром 10 мм: первый — $a \times b = 1 \times 3$ мм и второй — $a \times b = 3 \times 1$ мм при теоретических коэффициентах концентрации $\alpha_T = 1,6$ и 3,45.

Соответствующие средние разрушающие осевые напряжения на захватах $\sigma_{zz}^{np} = 500$ и 130 МПа.

Для этих данных моделировали процесс нагружения образцов при различной вариации исходных данных (см. табл. 1), ответственных за порообразование (см. рис. 3). При этом варианты № 1–10 соответствуют заданной нагрузке на захватах (сечение $z = L$), а вариант № 11 — заданному значению осевого перемещения $W = \Delta W n$, где n — шаг нагружения.

На рис. 4 для этого случая приведена кинетика изменения усилия P_z в процессе роста величины

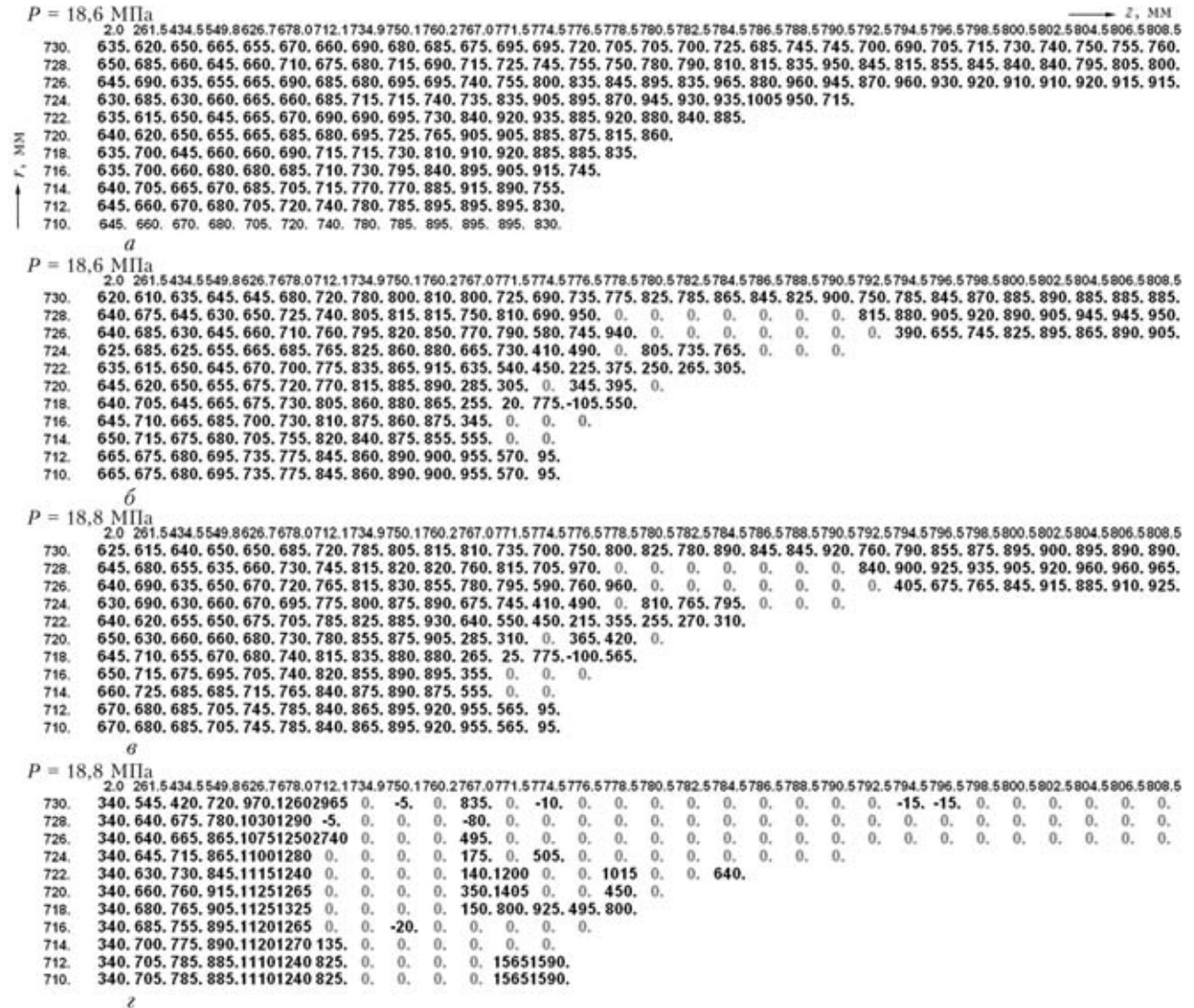


Рис. 5. Распределение главных напряжений σ_1 в продольном сечении $\beta = 0$ при различном внутреннем давлении: а, б — $P = 18,6$ МПа на первой (а) и последней итерации (б); в, з — $P = 18,8$ МПа на первой итерации (в) и последней (з). Нулями отмечены конечные элементы, где имеет место разрушение



зопасности в пределах $n_6 = 2...2,5$, показывает, что они достаточно хорошо согласуются.

Выводы

1. Математическое моделирование предельного состояния для стальных сосудов давления при наличии в стенке геометрических дефектов утонения требует более общих моделей для описания не только процесса деформирования (например, учет больших деформаций), но и процесса разрушения после стадии развитого пластического течения (например, порообразования).

2. Показано, что привлечение достаточно известных физических моделей порообразования при пластическом течении приводит к определенному эффекту «охрупчивания» зоны разрушения, снижая при этом достаточно заметно предельную расчетную нагрузку (на 20...70 % и более).

3. Результаты сопоставления расчетных предельных нагрузок в табл. 2 по методике данной работы с допускаемыми по работе [7] на основе обширного эксперимента показывают, что назна-

чаемый обычно при этом коэффициент безопасности $n_6 \approx 2...2,5$ вполне согласуется с данными табл. 2.

1. Романова В. А. Моделирование процессов деформации и разрушения в трехмерных структурно-неоднородных материалах: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Томск, 2008. — 31 с.
2. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. Физико-механическое моделирование процессов разрушения. — С.-Пб.: Политехника, 1993. — 391 с.
3. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. — М.: Металлургия, 1986. — 224 с.
4. Статическая прочность и механика разрушения сталей / Под ред. В. Даля и В. Антонова. — М.: Металлургиздат, 1986. — 224 с.
5. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. — Киев: Наук. думка, 1976. — 320 с.
6. Напружений стан в зоні дефектів стоншення тонкостінних труб / В. І. Махненко, О. А. Великоіваненко, Г. П. Розинка, Н. І. Півторак // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / За ред. Б. Є. Патона. — К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ, 2009. — С. 18–21.
7. *Fitness-for-service*. American Petroleum Institute. Recommended practice 579. — First ed., 2000. — 625 p.

The tough fracture models allowing for the pores forming in plastic flow either at non-metallic inclusions or in matrix from the microcracks that do not propagate by the cleavage mechanism provide for the corresponding algorithms of growth of the pores due to plastic strains and respective redistribution of the stress-strain state. At present, the interest in these models is determined by growth of the scope of prediction and expert estimates for the welded structures, based on the calculation estimation of the limiting state. In a number of cases, in view of the trend to utilisation of high-strength and sufficiently ductile materials in the welded structures, the limiting state occurs under the tough deformation conditions at the rigid stressed state, which contribute to the pore formation. As a result, fracture takes place at relatively low plastic strains, this decreasing deformability of the corresponding weldments prior to the fracture.

Поступила в редакцию 20.07.2012

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕГКИХ СВАРНЫХ БАЛЛОНОВ

Разработана технология и изготовлена опытная партия легких сварных баллонов на расчетное рабочее давление 150 МПа с полезным объемом 5,0 л и удельной массой 0,5 кг/л. Баллон изготавливается из сварной прямошовной цилиндрической обечайки, к которой привариваются сферические днища и горловина. Для изготовления деталей баллона используется листовая сталь 25ХГСА толщиной 2,0 мм с пределом прочности после заключительной термообработки всего изделия на уровне 1200 МПа. Для обеспечения стабильности качества сварных баллонов на всех стадиях термообработки контролировалось качество ее исполнения. Баллоны испытаны по специальной программе согласно требованиям ДНАОП 000-1.07–94.

Легкие сварные баллоны предназначены для хранения различных газов под давлением.

Выполнена конструкторская разработка и опытно-промышленная проверка.