

Рис. 4. Геометрическая форма стенки резервуара: а — изометрия; б — вид сверху.

чета напряженно-деформированного состояния резервуара неидеальной геометрической формы требуется применение численных методов. Приведенные на рис. 3, 4 результаты расчета полных и мембранных напряжений получены при решении задачи упругого деформирования стенки резервуара на основе метода конечных элементов.

Корп. «Укрмонтажспецстрой», Техн. комитет «Спецмонтаж», Киев

Поступила в редакцию
30.11.2000

УДК 620.13.38

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ С МНОГОСЛОЙНОЙ СТЕНКОЙ. 1. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОПЕРЕНОСА ПО МЕЖСЛОЙНЫМ ЗАЗОРАМ

Ю. Н. ПОСЫПАЙКО

Общая характеристика проблемы. Разработка, изготовление и эксплуатация изделий с многослойной стенкой — аппаратов химических производств, трубопроводов, резервуаров и т. п. вызвано растущими требованиями к повышению производительности, мощности, надежности и безопасности оборудования высокого давления [1–3].

Особенностью технологии технического контроля таких изделий является необходимость испыта-

1. *ИТН-93*. Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. — Волгоград: Минтопэнерго России, 1995. — 188 с.
2. *Правила* технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. — М.: Недра, 1988. — 269 с.
3. *Правила* технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту (доповнення та зміни). — Київ. — 1997. — 121 с.
4. *РД-08-95-95*. Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М.: Госгортехнадзор России, 1995. — 34 с.
5. *Тенденции* в развитии комплексных требований к резервуарам для хранения нефти (зарубежный опыт) / А. М. Бородовский, Б. М. Медник, Ю. В. Радыш, А. А. Цвигун. — Киев: Основа, 2000. — 208 с.
6. *Радыш Ю. В., Киреев А. С.* Совершенствование базы диагностики технического состояния и прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 38–47.
7. *СНиП 2.09.03-85*. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Сооружения промышленных предприятий. — М.: Госстрой, 1986. — 56 с.
8. *СНиП 11-23-81**. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Стальные конструкции. М.: Госстрой, 1990. — 95 с.
9. *ВБН В.2.2-58.2-94*. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти та нафтопродуктів з тиском не вище 93,3 кПа. — Київ: Держ. комітет України по нафті і газу, 1994. — 98 с.
10. *Тимошенко С. П., Войтовский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. — М.: Наука, 1966. — 635 с.
11. *СНиП 2.01.07-85*. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. — М.: Госстрой, 1987. — 36 с.
12. *Лессиг Е. Н., Лилеев А. Ф., Соколов А. Г.* Листовые металлические конструкции. — М.: Госстройиздат, 1970. — 488 с.

ния на герметичность внутренних сварных соединений [4]. Это вызвано возможностью возникновения в процессе сварки сквозных дефектов во внутренних сварных швах, что может привести к проникновению рабочего, хранящегося или транспортируемого вещества из полости изделия в полость межслойных зазоров многослойной стенки. Накопление его там может стать причиной нарушения нормальной работы изделия или его разрушения.

© Ю. Н. Посыпайко, 2001

Обнаружение сквозных дефектов в сварных соединениях изделий с многослойной стенкой возможно при существовании газопереноса по межслойным зазорам. Для определения потока газа через межслойные зазоры необходимо знать их форму и геометрические размеры. Однако реальное строение межслойного зазора установить крайне сложно. Для расчета характеристик контакта двух необработанных металлических поверхностей используют статистические методы, позволяющие описать деформацию усредненных выступов и учесть законы распределения на поверхности выступов, волн и макроротклонений формы. Необходимо создание модели зазора, которая могла бы с заданной точностью описать и определить его параметры в процессе контакта поверхностей.

Определив параметры зазоров, необходимо смоделировать механизм газопереноса через межслойные зазоры, что позволит рассчитать величину потока газа в зазоре, скорость его заполнения и т. д. Таким образом, задача разработки технологии контроля герметичности сварных соединений изделий с многослойной стенкой включает в себя следующие этапы:

- анализ сквозных дефектов сварных соединений;
- анализ факторов, определяющих параметры межслойных зазоров;
- расчет сближения двух контактирующих поверхностей в межслойном зазоре;
- моделирование, расчет и исследование газопереноса по межслойным зазорам;
- анализ и выбор способов контроля герметичности сварных соединений;
- исследование выбранных способов контроля герметичности сварных соединений;
- разработка технологического оборудования для контроля герметичности.

Сквозные дефекты сварных соединений. В процессе сварки, как и в других технологических процессах обработки материалов, практически всегда возникают различные дефекты. Образование дефектов определяется характером взаимодействия жидкого и твердого металлов, а также металлов с газами и шлаками. В различных участках зоны сварки одновременно протекает целый ряд процессов: нагрев, плавление, испарение, кристаллизация и охлаждение металла, переход веществ из одной фазы в другую, перераспределение веществ внутри фазы, взаимодействие различных компонентов и т. д. Многообразие причин, в той или другой мере определяющих образование дефектов в сварном соединении, подробно рассмотрены в литературе [5–7].

Показано, что при сварке плавлением в результате протекания различных физических и химических процессов всегда есть условия для образования дефектов (пор, неметаллических включений, трещин и др.) в сварном соединении или создания факторов, способствующих образованию дефектов (химическая и физическая неоднородность, структурные изменения и др.).

Особенно склонны к образованию дефектов сварные соединения, выполненные в многослойных изделиях. Наличие воздуха, продуктов коррозии и различных загрязнений в межслойных зазорах,

контактирующих при сварке с жидким металлом, может при неблагоприятных условиях привести к образованию в швах дефектов, в том числе, сквозных. Они особенно нежелательны во внутренних швах, так как через них транспортируемый или хранящийся продукт будет проникать в межслойные зазоры, накапливаться там, и может стать причиной нарушения нормальной работы изделия. На рис. 1 показано расположение наиболее характерных сквозных дефектов в кольцевых стыковых и продольных нахлесточных сварных соединениях многослойных труб (поры, непровары, трещины) по их сечению (а) и поверхности (б).

На рис. 2 показаны макрошлифы кольцевых стыковых и продольных нахлесточных сварных соединений со сквозными дефектами. Как видно из рисунков, дефекты зарождаются возле межслойного зазора и пронизывают сварной шов.

Факторы, определяющие параметры межслойных зазоров. Факторами, определяющими форму и размеры межслойных зазоров, являются: силовое воздействие на многослойную стенку (механическое экспандирование, гидравлическое давление и др.), физико-механические свойства поверхностного слоя (предел текучести материала, модуль упругости, твердость, микротвердость и др.), рельеф поверхностного слоя (макроротклонения формы, волнистость и шероховатость) и конструктивные особенности изделия (тип навивки, расположение сварных швов и др.). Схема их взаимодействия приведена на рис. 3.

Силовое воздействие на многослойное изделие предусмотрено, как правило, технологией его изготовления. Наибольшее силовое воздействие оказывает экспандирование — «растяжка» слоев с целью увеличения контактной жесткости. Силовое воздействие ведет к сближению поверхностей и изме-

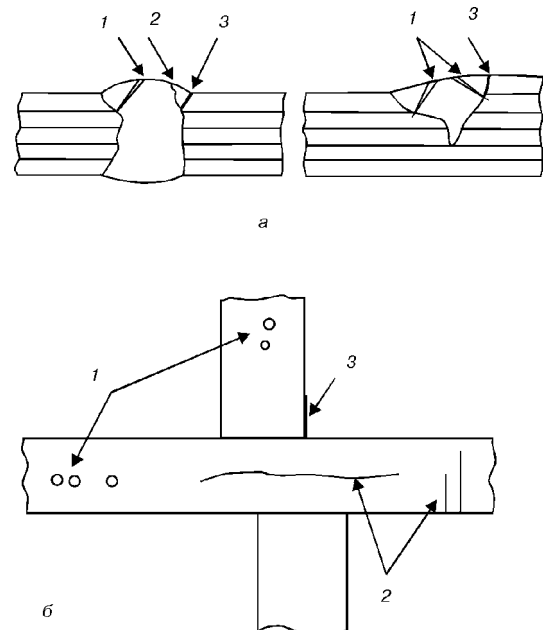


Рис. 1. Расположение наиболее характерных сквозных дефектов в кольцевых стыковых и продольных нахлесточных сварных соединениях многослойных труб: а — по сечению швов, б — по поверхности швов (1 — поры, 2 — трещины, 3 — несплавление по кромке).

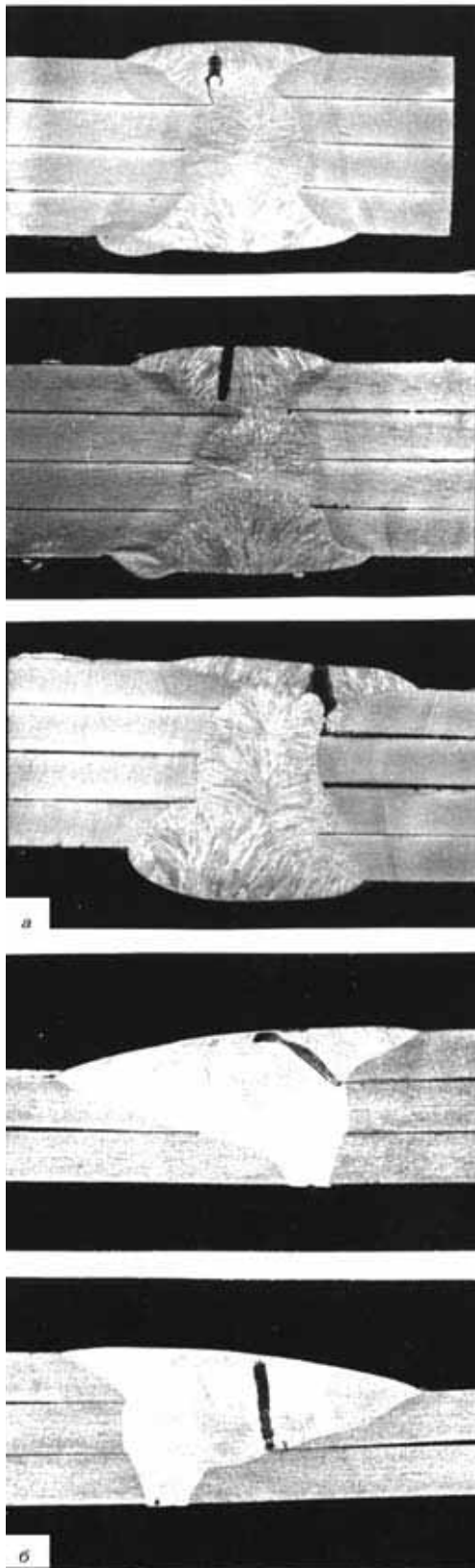


Рис. 2. Наиболее характерные сквозные дефекты кольцевых стыковых (а) и продольных нахлесточных (б) сварных соединений многослойных труб.

няет конструктивные параметры, например, увеличивает площадь контакта поверхностей. Конструктивные особенности изделия, физико-механические свойства поверхностного слоя и рельеф поверхнос-

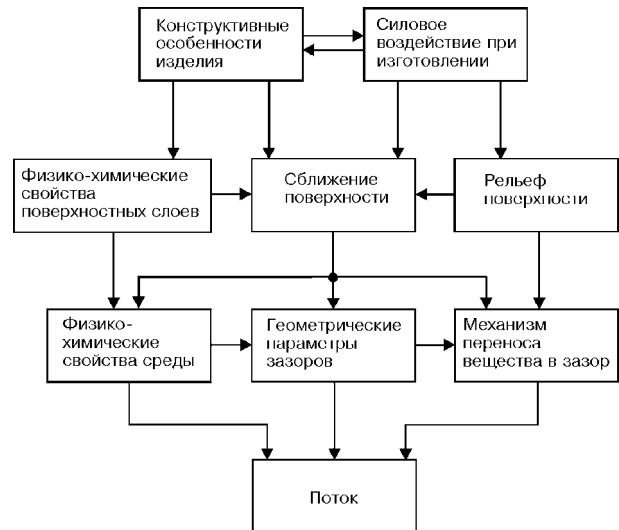


Рис. 3. Схема взаимодействия факторов, влияющих на перенос газа по межслойным зазорам.

ти в свою очередь влияют на эффективность силового воздействия и сближения поверхностей.

В общем виде многослойное изделие как объект исследования можно представить структурной схемой, приведенной на рис. 4, на которой показаны три группы параметров:

а) управляющие входные параметры X : действующая приложенная сила N , отклонения W формы поверхности, волнистость H поверхности, шероховатость R поверхности, средний шаг шероховатости S_m , входное давление p испытательного вещества, температура T испытательного вещества;

б) существующие параметры Y : номинальная площадь A_a контакта, предел прочности σ , металла, коэффициент Пуассона μ , модуль упругости металла E , коэффициент вязкости η испытательного вещества;

в) выходной параметр состояния Z : поток Q газа через межслойный зазор.

Управляющие параметры X представляют собой независимые переменные, которые можно изменять с целью управления выходными параметрами объекта. Существующие параметры Y характеризуют объект исследования в целом. Они практически не изменяются в рамках данного объекта и конкретного эксперимента. К выходным параметрам состояния Z относятся контролируемые или вычисляемые параметры, характеризующих состояние объекта. В нашем случае это — поток Q газа через межслойный зазор.

Одной из основных задач анализа является выявление взаимосвязей между входными и выходными параметрами объекта и представление их в количественной форме. Такое математическое отображением наиболее существенных взаимосвязей между параметрами объекта позволяет получить информацию о процессах, протекающих в объекте, а также использовать ее для управления объектом с целью поиска оптимальных условий.

Расчет сближения двух контактирующих поверхностей в межслойном зазоре. Параметры межслойных зазоров многослойных изделий определялись нами расчетным путем на основе теории

контактного взаимодействия поверхностей. Вопросы контактного взаимодействия двух поверхностей имеют весьма широкое приложение. Они учитываются при оценке трения и контактной жесткости, при определении электро- и теплопроводности контакта, при расчетах площади соприкосновения тел и изучении массопереноса по межповерхностным зазорам [8–12].

Теория контактного взаимодействия исходит из того, что реальная поверхность металла имеет отклонения от номинальной поверхности. Неровности поверхности разделяют на макроотклонения формы, волнистость и шероховатость.

Поверхность листового проката, из которого изготавливаются стенки многослойных изделий, характеризуется нерегулярным микрорельефом, отличающимся значительной неоднородностью по ширине и длине полос. Неоднородность шероховатости и волнистости сочетается со сравнительно высоким макроотклонением формы (коробоватостью, серповидностью и т.д.)

Фактическая площадь контакта A_r двух реальных поверхностей состоит из отдельных дискретных площадок, расположенных на разных высотах, под разными углами, с разной степенью упругих и пластических деформаций металла.

Для описания физической картины контактного деформирования микрорельефа двух однородных поверхностей при их сближении под воздействием нагрузки N необходимо учитывать:

- распределение выступов по высоте $n_r(y)$;
- площадь сечения выступов на уровне $y_{н.л}$;
- вероятность встречи пары выступов двух поверхностей;
- вероятность нахождения выступа в слое dn_2 ;
- распределение по высоте различных видов микронеровностей;
- базовую длину и целый ряд других величин.

Это приводит к достаточно громоздким теоретическим выражениям для контактного сближения поверхностей с микронеровностями под действием приложенной нагрузки, расчет которых возможен только на ЭВМ.

Нормальное сближение двух поверхностей с одинаковыми механическими свойствами поверхностных слоев можно представить в виде равенства

$$y = 2(y_{н.л} + y_{уп}), \quad (1)$$

где $y_{н.л}$ — пластические контактные деформации поверхностных слоев под действием силы N контактирующих тел; $y_{уп}$ — упругие перемещения следующих ниже слоев контактирующих тел.

Опуская здесь описание теоретических расчетов, приведем выражения для инженерного расчета слагаемых в формуле (1):

$$y_{н.л} = [2\pi NR_a H_z W_z / \sigma_t A_a]^{1/3}. \quad (2)$$

$$y_{уп} = \pi c \sigma_t \Sigma_M (1 - \mu^2) y_{н.л}^{1/3} / ER_a, \quad (3)$$

где N — нагрузка, приходящаяся на номинальную площадь контакта A_a , R_a , H_z , W_z — параметры шероховатости, волнистости и макроотклонения формы; σ_t — предел текучести металла; c — коэффи-

циент стеснения, $c = 2,82$; S_M — средний шаг выступов шероховатости; μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости.

Полученные уравнения описывают сближение двух поверхностей многослойного изделия как функцию давления: $y = f(N/A_a)$.

Характеристики неровности поверхности прокатанной стальной полосы, используемой для изготовления многослойных изделий, имеют значения: шероховатость $R_a = 1... 2$ мкм, $S_m = 1... 5$ мкм; волнистость $H_z = 5... 20$ мкм; макроотклонения формы $W_z = 50... 100$ мкм. Прочностные характеристики стальной полосы имеют следующие значения: $\sigma_t = 600$ МПа, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$.

Таким образом, зная значения характеристик неровностей поверхности стальной полосы, из которой изготавливается многослойное изделие, и действующие усилия сжатия поверхностей, можно рассчитать сближение контактирующих поверхностей: зависимости $y = f(N/A_a)$ для различных значений R_a , S_m , H_z и W_z . На рис. 5 представлены зависимости $y = f(N/A_a)$ для минимальных и максимальных значений R_a , S_m , H_z и W_z .

Методы расчета потока газа через межслойные зазоры. Анализ расчетных методов определения потока газа через контакт двух металлических поверхностей позволяет выделить три основных направления:

методы, основанные на расчете потока газа по эмпирическим зависимостям;

методы, основанные на расчете потока газа по уравнениям для гладких (плоских) приведенных каналов высотой δ ;

методы, основанные на использовании пористой модели стыка двух металлических поверхностей, обладающих определенной шероховатостью, волнистостью и макроотклонением формы, с применением законов фильтрационного движения газа.

Первое направление использует эмпирические зависимости типа $Q = f(q, p, l)$, характеризующие перенос газа через стык двух поверхностей. Для этого необходимо знать значения удельных нагрузок q на контролируемые поверхности, давление p

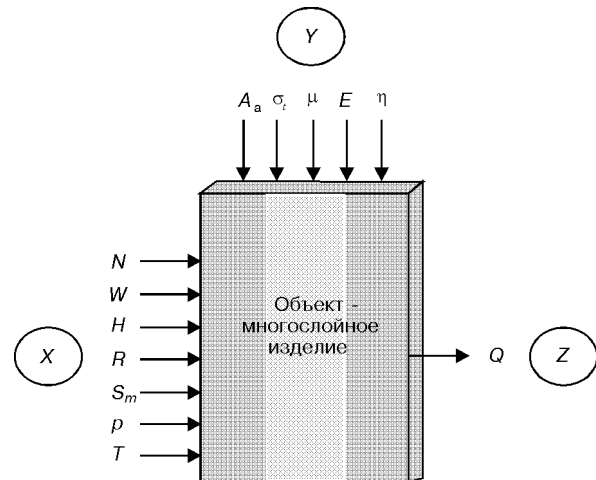


Рис. 4. Структурная схема объекта исследования для составления модели взаимосвязей между входными и выходными параметрами: X — управляющие входные параметры; Y — существующие параметры; Z — выходной параметр состояния.

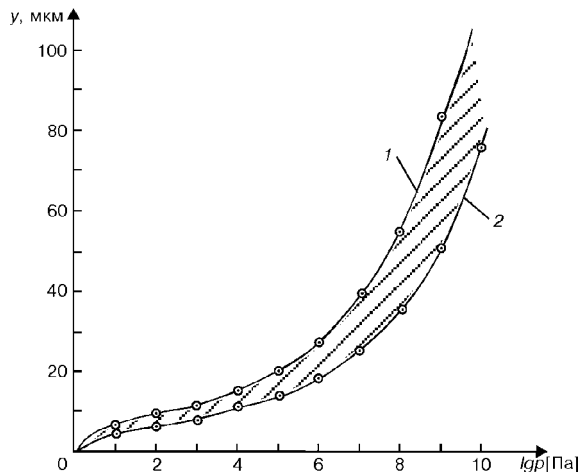


Рис. 5. Зависимость сближения y двух поверхностей многослойного изделия под действием силы сжатия: 1 — максимальные значения $R_{\sigma}, S_m, H_2, W_2$; 2 — их минимальные значения.

газа, перетекающего по зазору, а также размеры и характеристики состояния поверхности.

Применение эмпирических зависимостей для прогнозирования переноса газа через стык контактирующих поверхностей возможно только для приближенной оценки потока в хорошо изученных случаях, например, в случае оценки герметизации трубопроводной арматуры [13, 14]. Попытки создать эмпирическую зависимость для потока газа через стык контактирующих необработанных металлических поверхностей большого размера не дали положительных результатов. Поэтому метод расчета нами дальше не рассматривается.

Второе направление использует расчетную модель на основании уравнения движения вязкой несжимаемой среды, граничным условием для которого является равенство нулю скорости движения на поверхности, ограничивающей поток [15, 16].

Решение уравнения для этих условий, полученное для потока газа в вязкостном режиме течения (уравнение Пуазейля) через зазор шириной h , высотой δ и длиной l при перепаде давления между концами зазора ($p_2 - p_1$), имеет вид

$$Q_v = h\delta^3(p_2 - p_1) / 24\eta l, \quad (4)$$

где η — коэффициент динамической вязкости газа, Па·с.

Решение уравнения, полученное для потока газа в молекулярном режиме течения (уравнение Кнудсена) при тех же условиях имеет вид

$$Q_M = 2h\delta^2 v_{cp} (p_2 - p_1) / 3l, \quad (5)$$

где $v_{cp} = (8RT / \pi M)^{1/2}$ — средняя скорость молекул; R — универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К) = $8,31 \cdot 10^3$ м²/(с²·град); T — абсолютная температура, град; M — молекулярная масса газа, кг/моль.

Между молекулярным и вязкостным течением нет четкой границы. В большом диапазоне давлений существует так называемое промежуточное течение, для которого поток можно определить по формуле (обобщенное уравнение Кнудсена)

$$Q_{\Pi} = Q_v + zQ_M, \quad (6)$$

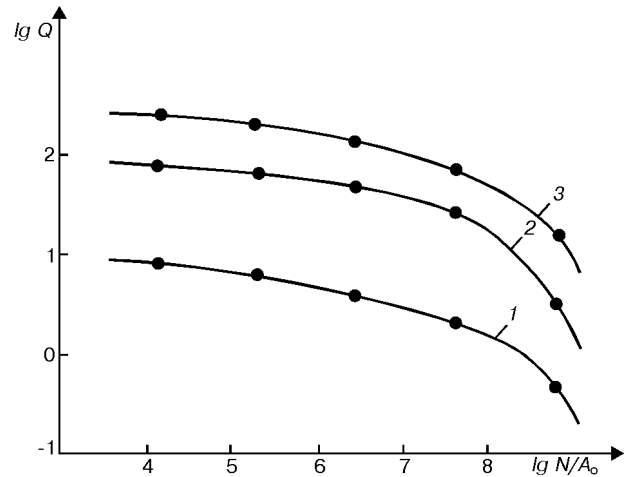


Рис. 6. Зависимость потока Q газа через щелевидный зазор от силы сжатия N/A_0 поверхностей, образующих этот зазор: 1 — Q'_{max} , при $P_2 = 2 \cdot 10^3$ Па; 2 — Q''_{max} , при $P_2 = 6 \cdot 10^3$ Па; 3 — Q'''_{max} , при $P_2 = 10 \cdot 10^3$ Па.

где z — сложного вида эмпирическая функция $z(\delta, p)$, введенная Кнудсенем для приведения расчетной зависимости в соответствие с наблюдавшейся им экспериментально. При переходе от вязкостного течения к молекулярному коэффициент z меняется от 0,81 до 1,0 и в практике расчетов часто принимают его равным 0,9.

Границы между режимами течения определяются соотношениями длины свободного пробега молекулы λ к характерному размеру δ полости, по которой протекает газ (для зазора это его высота). Длина свободного пробега определяется по формуле:

$$\lambda = kT / 1,4\pi d^2 p_{cp}, \quad (7)$$

где k — постоянная Больцмана; d — диаметр молекулы; p_{cp} — среднее давление в зазоре, $p_{cp} = (p_1 + p_2) / 2$.

Промежуточное течение газов характерно для диапазона $1/3 \geq \lambda/\delta \geq 5 \cdot 10^{-3}$. При $\lambda/\delta > 1/3$ — течение молекулярное, при $\lambda/\delta < 5 \cdot 10^{-3}$ — вязкостное. Для воздуха при $T = 293$ °К граница промежуточного течения $0,02 \leq p_{cp}\delta \leq 1,33$; при $p_{cp}\delta < 1,33$ — течение вязкостное, при $p_{cp}\delta < 0,02$ — молекулярное.

При переносе газа по межповерхностным зазорам принято считать, что потоки, превышающие 10^{-3} м³Па/с — вязкостные, меньше 10^{-5} м³Па/с — молекулярные.

Уравнения (4) и (5) широко применяются в практике моделирования механизма протекания газа по межслойной полости. Однако они не учитывают особенностей течения газов через зазоры, связанные с наличием значительного перепада давлений по длине зазора. При этом на разных участках зазора одновременно существуют разные режимы течения газа. Для вычисления потока газа через межслойную полость следует пользоваться уравнением (6).

Высоту зазора δ (или δ_{cp}) следует определить на основе теории контактного взаимодействия поверхностей или экспериментально, измерив объем полости межповерхностных зазоров. Высота зазора δ

определяется в теории контактного взаимодействия двух поверхностей следующим образом:

$$\delta = W_z + H_z + 2R_p - y, \quad (8)$$

где W_z — средняя высота макроотклонений формы; H_z — средняя высота волнистости; R_p — средняя величина шероховатости; y — величина сближения поверхностей под воздействием нагрузки, определяемая уравнением (1).

Таким образом, уравнения (1) — (8) позволяют рассчитать величину потока газа через щелевидный зазор в зависимости от силы сжатия поверхностей, образующих зазор, и характеристик поверхностей, при различных перепадах давления газа на зазоре ($p_2 - p_1$). На рис. 6 представлена зависимость потока Q газа через щелевидный зазор обечайки многослойной трубы от силы сжатия N/A_a поверхностей, образующих этот зазор, для случая максимальных значений R_a , H_z и W_z и трех значений входного давления p_2 : 0,2; 0,6 и 1,0 МПа.

Нами разработана диалоговая программа компьютерного расчета газовых потоков, предусматривающая ввод параметров поверхностей, образующих щелевидный зазор и вывод на экран графиков зависимости $Q = f(N/A_a)$. Предложенный подход дает косвенную возможность рассчитать время заполнения тупиковых зазоров на основе уравнения $Q = V/t$, но без учета влияния уменьшения потока по мере заполнения зазора.

Третье направление расчета потока основано на представлении стыка двух контактирующих поверхностей как некоторой пористой структуры и применения к ней основных законов фильтрационного движения газов. Так как форма, высота и распределение неровностей на обеих поверхностях случайны, то, следовательно, контактный слой, образованный сжатиями поверхностями неровностями, характеризуется наличием множества случайных микроканалов и пор, разнообразных по форме и протяженности. Вся совокупность микроканалов и пор может быть рассмотрена как некоторый слой пористого тела, параметры которого изменяются по мере сближения контактирующих поверхностей [17–20].

Для определения расхода газа через стык двух поверхностей следует использовать уравнение неразрывности фильтрационного потока. Допустив, что течение газа вязкостное, установившееся; скорость потока в плоскости, перпендикулярной его движению, постоянна; пористость по стыку распределена равномерно; давление газа по длине стыка изменяется линейно; коэффициент динамической вязкости газа не зависит от давления, массовый расход сжимаемого газа можно описать уравнением Дарси:

$$Q = (A_s K_n / RT \mu) p dp / dr, \quad (9)$$

где A_s — площадь сечения контактного слоя, через которую происходит фильтрация; K_n — коэффициент проницаемости; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; μ — динамический коэффициент вязкости; p — давление газа.

Совершив многочисленные преобразования, после интегрирования получим

$$Q = \pi V_s^3 (p_2^2 - p_1^2) / 4 \mu k A_a^3 R T (\ln r_2 / r_1), \quad (10)$$

где V_s — объем свободного пространства пор; A_a — номинальная площадь контакта; k — константа Кармана, зависящая от формы каналов; обычно $k = 4,5 \dots 5,0$.

В соответствии с этой моделью разработана программа компьютерного расчета, позволяющая визуализировать поля давления в зазоре в различные моменты времени. Она также позволяет строить зависимости от времени интегральных характеристик: расхода газа источника, расхода газа через течь, давления газа в удаленной точке зазора и др.

Исследование заполнения газом полости межслойных зазоров. Нами проведено исследование заполнения газом обечаяк (156 шт.) многослойных труб и многослойных баллонов (4 шт.) в лаборатории на Харцызском трубном и Выксунском металлургическом заводах и строительстве опытного участка газопровода из многослойных труб.

Газ давлением 0,4...0,8 МПа подавался в полость межслойных зазоров обечаяк и баллонов через дренажные и специально выполненные отверстия. Давление газа в полости зазоров регистрировалось манометрами.

Исследования показали существенное различие в характере заполнения полости межслойных зазоров обечаяк, не подвергавшихся и подвергавшихся экспандированию. На рис. 7, а представлены результаты исследований заполнения зазоров обечаяк, не подвергавшихся экспандированию, а на рис. 7, б — обечаяк, экспандирование которых выполнено на заводском оборудовании с целью придания обечайкам большей контактной жесткости и устойчивости.

Время заполнения межслойных зазоров неэкспандированных обечаяк равно 0,5...2,0 мин. (до уровня $p/p_{вх} = 0,9$). Для обечаяк, прошедших технологическое экспандирование, характерен большой разброс величин времени заполнения зазоров от изделия к изделию — от 3 до 25 мин. Тем не менее графики зависимости $p/p_{вх} = f(t)$ для большинства обечаяк (86%) располагаются в зоне I, т. е. в зоне хорошего заполнения. Графики остальных 14% обечаяк располагаются в зоне II, т. е. в зоне медленного заполнения.

В некоторых случаях наблюдалось значительное замедление роста давления dp/dt на каком-то уровне p , причем $p/p_{вх} < 1$. Такое «перекрытие» межслойных зазоров замечено на 12-ти обечайках (16%). Одной из наиболее вероятных причин «перекрытия» зазоров является движение слоев внутри стенки изделия под воздействием возникающих перепадов давления. На этих обечайках испытан способ «медленного» роста давления на входе в отверстие — 0,002...0,004 МПа/с. В большинстве обечаяк (кроме 3-х из 12-ти) это устранило явление «перекрытия» зазоров и удалось достичь примерного равенства $p_{вх} \cong p_{ин}$. Таким образом, результаты экспериментов показали, что для многослойных изделий, подвергавшихся технологическому экспандированию, целесообразно применить способ «медленного» роста давления на входе в отверстие. Для обечаяк многослойных труб это означает, что

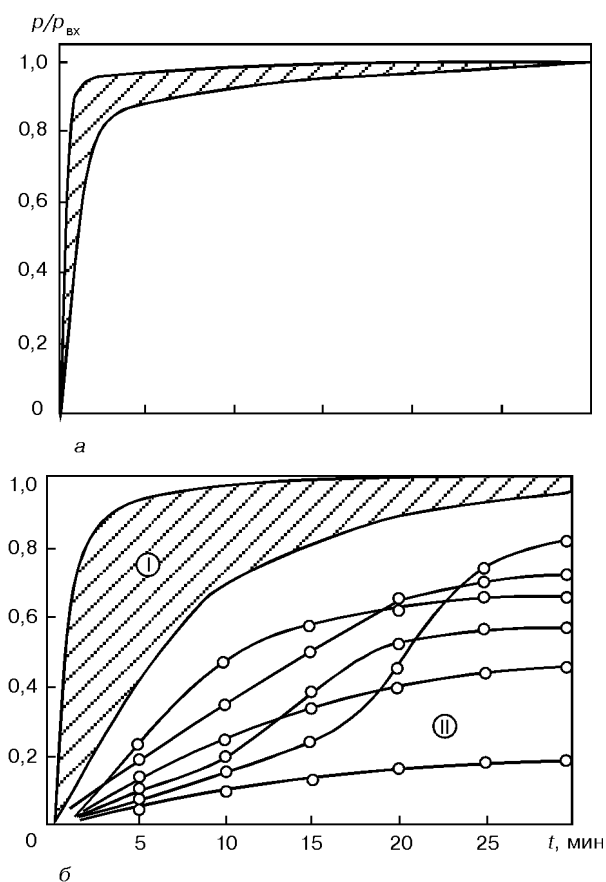


Рис. 7. Зависимость давления p газа в межслойных зазорах от времени заполнения t для неэкспандированных (а) и экспандированных (б) обечаек (входное давление $P_{вх}$).

увеличение давления до 0,4... 0,6 МПа должно происходить в течение 3... 5 мин.

ВЫВОДЫ

1. Анализ сквозных дефектов сварных соединений изделий с многослойной стенкой показал, что такие дефекты открывают доступ из полости изделия в полость межслойных зазоров, а проникновение через них рабочего, хранящегося или транспортируемого вещества под высоким давлением может стать причиной нарушения нормальной работы изделия или его разрушению.

2. Контроль герметичности сварных соединений изделий с многослойной стенкой возможно при существовании газопереноса по межслойным зазорам. Для определения потока газа через межслойные зазоры необходимо знать их форму и геометрические размеры. Факторами, определяющими форму и размеры межслойных зазоров, являются: силовое воздействие на многослойную стенку, физико-механические свойства поверхностного слоя, рельеф поверхностного слоя и конструктивные особенности изделия.

3. Расчет сближения двух контактирующих поверхностей в межслойном зазоре выполнен на основе теории контактного взаимодействия твердых тел. Приведены формулы для инженерного расчета

сближения контактирующих поверхностей под действием усилий сжатия (1)–(3).

4. Анализ методов расчета газопереноса через контакт двух металлических поверхностей позволил создать формулы для инженерного расчета газового потока через щелевидный межслойный зазор изделия с многослойной стенкой. Созданы программы компьютерного расчета газовых потоков, позволяющие визуализировать поля давления в межслойных зазорах в различные моменты времени от начала подачи газа в зазор.

5. Выполнены исследования заполнения газом обечаек многослойных труб и многослойных баллонов. Исследования показали существенное различие в характере заполнения полости межслойных зазоров обечаек, не подвергавшихся и подвергавшихся технологическому экспандированию. Время заполнения межслойных зазоров не экспандированных обечаек равно 0,5... 2,0 мин. Для обечаек, прошедших экспандирование, характерен большой разброс величин времени заполнения зазоров от изделия к изделию — от 3 до 25 мин.

В некоторых случаях наблюдалось замедление роста давления в межслойном зазоре на каком-то уровне p , причем $p/p_{вх} < 1$. Предложен способ «медленного» роста давления на входе в межслойные зазоры — 0,002... 0,004 МПа/с, с целью предотвращения явления «перекрывания» зазоров. Для обечаек многослойных труб это означает, что увеличение давления до 0,4... 0,6 МПа должно происходить в течение 3... 5 мин.

1. Новиков В. И. Многослойные сварные конструкции / Многослойные сварные конструкции и трубы. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 20–24.
2. Макаров В. М. Совершенствование рулонированных сосудов высокого давления. — Там же. — С. 14–19.
3. Патон Б. Е., Билецкий С. М. Конструкция, технология и основные характеристики многослойных труб для магистральных газопроводов — Там же. — С. 5–14.
4. Трущенко А. А., Посытайко Ю. Н. Особенности контроля герметичности сварных соединений многослойных труб / Передовой опыт неразрушающего контроля качества сварных соединений. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 134–136.
5. Деев Г. Ф., Пацкевич И. Р. Дефекты сварных швов. — Киев: Наук. думка, 1984. — 208 с.
6. Подгаецкий В. В. Пори, включения и трещины в сварных швах. — Киев: Техніка, 1972. — 236 с.
7. Походня И. К. Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
8. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. — М.: Наука, 1970. — 227 с.
9. Демкин Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. — М.: Изд. АН СССР, 1962. — 111 с.
10. Трение, изнашивание, смазка. Справ. в 2-х кн // Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. — М.: Машиностроение, 1978. — Кн. 1. — 400 с.
11. Рыжов Э. В. Основы расчета стыковых поверхностей на контактную жесткость. — М.: Машгиз, 1962. — 143 с.
12. Рудзит Я. А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. — Рига: Зинате, 1975. — 210 с.
13. Гуревич Д. Ф. Трубопроводная арматура. Справ. пос. — Л.: Машиностроение, 1981. — 368 с.

(Окончание см. на с. 31)

Окончание. Начало на с.20.

14. Белов С. В., Новиков Ю. М. Герметичность разъемных соединений и клапанных пар. Обзорная информация. Серия ХМ-6. Криогенное и вакуумное машиностроение. — М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1983. — 32 с.
15. Ланис В. А., Левина Л. Е. Техника вакуумных испытаний. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 263 с.
16. Левина Л. Е. Обобщенное эмпирическое уравнение для описания процесса перетекания газов по малым каналам. — Дефектоскопия. — 1980. — №1. — С. 75–80.
17. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.
18. Лемберский Б. В., Фишкин Р. В., Домашнев А. Д. Расчет величины утечки через неподвижные разъемные соединения. — Химическое и нефтяное машиностроение. — 1977. — № 4. — С. 10–11.
19. Новиков Ю. М., Белов С. В. Утечки газа через стык шероховатых поверхностей. — Машиностроение. — 1981. — № 11. — С. 70–73.
20. Демкин Н. Б., Алексеев В. А., Лемберский В. Б., Соколов В. И. Расход газа через стык контактирующих поверхностей. — Там же. — 1976. — № 6. — С. 40–44.

*Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев*

*Поступила в редакцию
20.03.2001*