

УДК 539.3

О ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВАХ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПАКЕТОВ

БОРОДИЧ Ф. М.

В настоящее время многослойные металлические конструкции широко применяются в промышленности [1], в частности при изготовлении сосудов высокого давления. При расчете напряженного состояния многослойных сосудов (изготавливаемых из листов проката) возникает задача учета существенно нелинейного характера деформирования стенки в поперечном к слоям направлении. Такой характер деформирования вызван влиянием межслойных зазоров, которые возникают из-за слабых колебаний толщины слоев и других неправильностей их геометрической формы.

Расчет реальных сосудов необходимо вести с учетом конкретного способа их изготовления, а также с учетом пластических свойств материала слоев. Пластическая вытяжка слоев сосуда во время его опрессовки сильно уменьшает их начальную погибь, однако влияние ее на уменьшение зазоров, обусловленных разнотолщинностью слоев, должно быть менее заметным. Поэтому изучение закономерностей работы слоев в упругой стадии имеет значение для расчета сосудов как до, так и после опрессовки. Эти закономерности изучались экспериментально при сжатии плоских пакетов¹.

Для описания нелинейно-упругих деформативных свойств многослойных пакетов (как при дискретном способе изучения пакета [2], так и при замене его сплошным анизотропным телом [3]) использовалась степенная формула Баха [4]. Эта формула позволяет хорошо аппроксимировать точки интегральной зависимости «перемещение — нагрузка», однако не отражает ряда особенностей деформирования многослойных тел [5] (в частности, не отражает характер изменения поперечного касательного модуля пакета).

В связи с этим были предприняты попытки описания процесса сжатия пакета без использования формулы Баха [5–8]. В [6] принималось, что в рассматриваемом процессе объем межслойных полостей уменьшается за счет изгибания слоев. Жесткость пакета, вычисленная в рамках такой модели [6], возрастает существенно быстрее, чем это наблюдается в экспериментах.

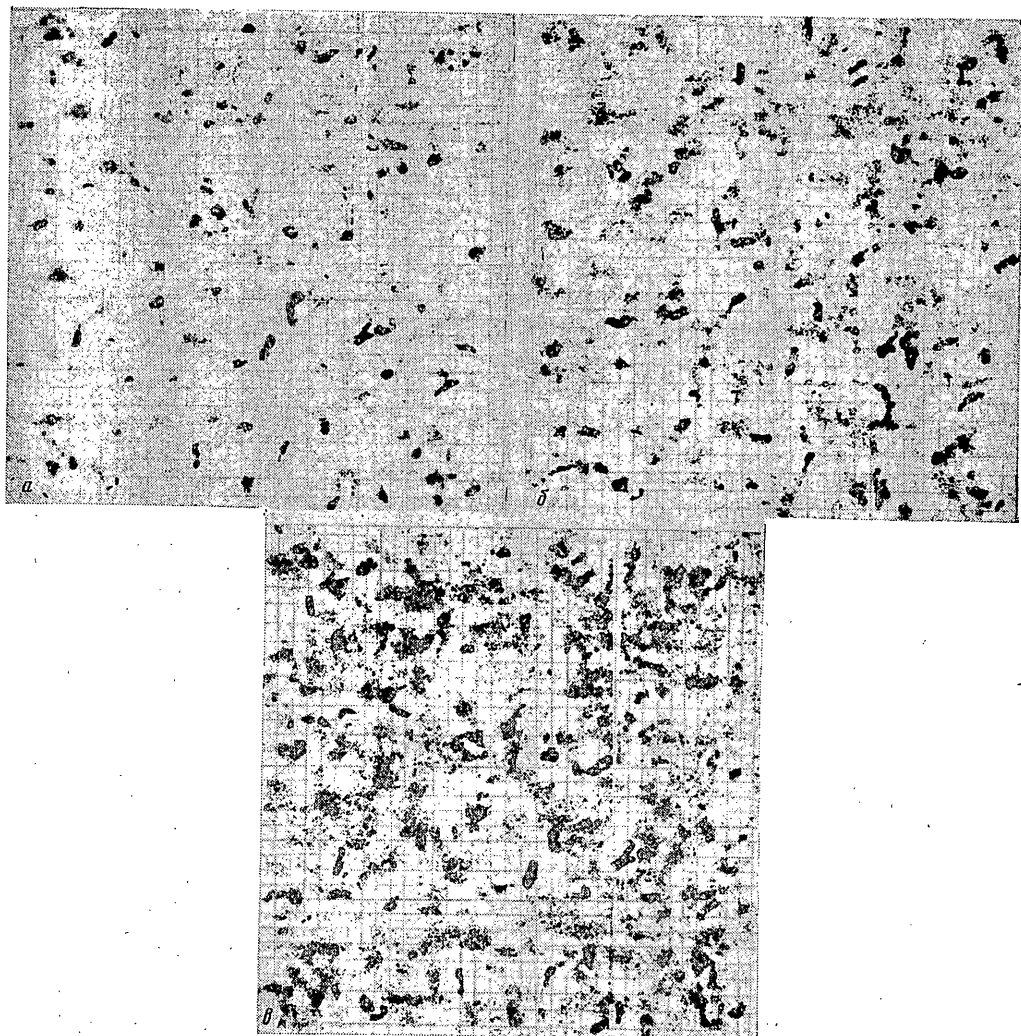
Впоследствии, была построена модель, в которой использовалась гипотеза об автомодельном характере дробления межслойных полостей [7]. В рамках этой модели справедлива формула для касательного модуля пакета, хорошо согласующаяся с экспериментами. Однако модель содержала весьма искусственную гипотезу, противоречащую эксперименту (гипотеза заключается в том, что слои не соприкасаются лишь по изолированным дискообразным полостям, а эксперимент показывает, что, наоборот, контакт происходит по отдельным изолированным областям малого размера).

В публикуемой работе получена ранее выведенная формула для касательного модуля сжимаемого пакета [5, 7] (хорошо согласующаяся с экспериментом), исходя из вполне реалистических гипотез, с помощью метода, разработанного в [9]; на основе методов [10, 11] определяется ряд других эффективных упругих характеристик многослойных пакетов.

1. Качественное исследование взаимодействия слоев и модель упругого сжатия пакета. Для исследования взаимодействия слоев у квадратных пакетов (составленных из нескрепленных слоев стального проката) при их поперечном сжатии проводились следующие эксперименты: между каждыми соседними слоями проката вкладывался лист бумаги, покрытый копировальной. Затем пакеты сжимались при различных нагрузках.

На фиг. 1 приведены отпечатки областей межслойных контактов, полученные между 10-м и 11-м слоями в двадцатислойном пакете (средняя

¹ Бородич Ф. М. Экспериментальные исследования процесса сжатия многослойных металлических пакетов. М., 1985. 106 с.— Деп. в ВНИИИС Госстроя СССР. 12.09.85. № 6223-85.



Фиг. 1

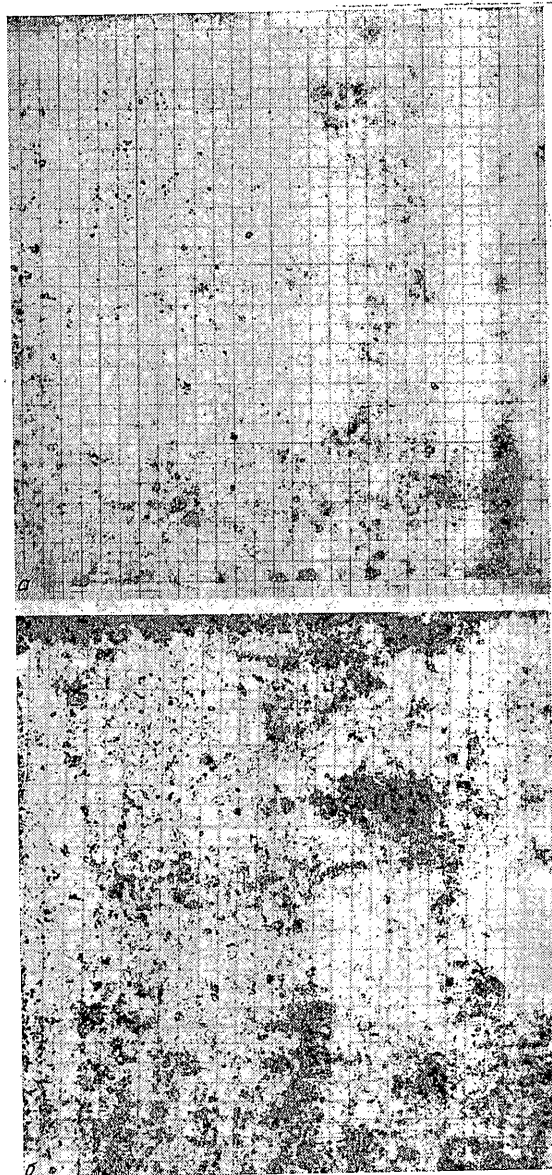
толщина слоев 2,25 мм, длина стороны 29,5 см), сжатом нагрузкой 1, 2 и 4 МН соответственно. Для более наглядного выявления характерных особенностей работы слоев с начальными неправильностями слои были заранее погнуты.

Из полученных изображений видно, что взаимодействие слоев происходит в отдельных областях, малых по сравнению с размерами пакета. По мере возрастания нагрузки число областей контакта увеличивается и уменьшаются расстояния между ними.

Аналогичная, но менее ярко выраженная картина наблюдалась на пакетах, собранных из слоев проката в состоянии поставки. На фиг. 2 приведены отпечатки областей контакта, полученные между пятым и шестым слоями в 20-слойном пакете (средняя толщина слоев 5,8 мм, длина стороны 30 см), сжатом нагрузкой 1 и 4 МН соответственно.

На тех же пакетах выполнены эксперименты, в которых получена и количественная информация о рассматриваемом процессе (см. п. 3).

Процесс сжатия пакетов равномерным давлением можно разбить на два участка. На первом из них (при возрастании давления от нуля до некоторого порогового давления P_a) процесс является неустановившимся и зависит от случайных обстоятельств (например, при перемене порядка следования слоев в пакете меняется величина поперечной деформации $\varepsilon(P_a)$). На втором участке (при сжимающем давлении выше порогового) процесс устанавливается и не зависит от последовательности сборки



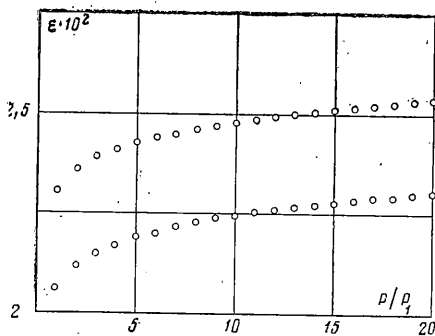
Фиг. 2

слоев. Для иллюстрации на фиг. 3 приведены экспериментальные точки² зависимости поперечной деформации $\epsilon \cdot 10^2$ от номинального сжимающего давления P для двух пакетов площадью 900 см^2 со средней толщиной каждого слоя $11,88 \text{ мм}$, различающихся только порядком следования слоев (шаг нагрузки $P_1 = 2,22 \text{ МПа}$). При давлениях свыше P_a графики совпадают с точностью до переноса вдоль оси ϵ .

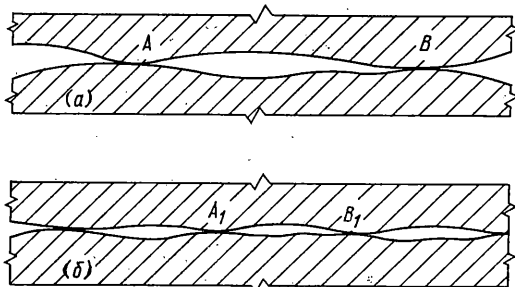
Наблюдаемую в опытах картину можно объяснить тем, что при механическом контакте соприкосновение двух шероховатых поверхностей носит дискретный характер, т. е. контакт происходит по отдельным площадкам, которые при наличии волнистости концентрируются в областях, называемых контурными [12]. Возрастание сжимающей нагрузки ведет к упругому сближению лицевых поверхностей слоев и увеличению числа микронеровностей, воспринимающих нагрузку.

Волнистость в слоях вызвана их погнутостями и слабыми колебаниями толщин. При сжатии пакета давлением P_a слои уже настолько плотно

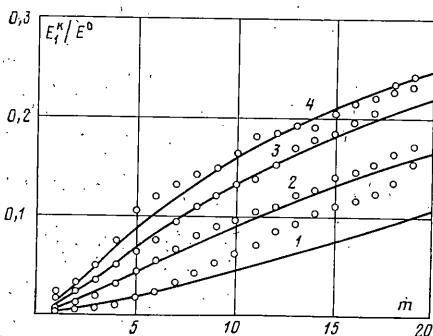
² См. указ. публ. с. 105.



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

прилегают друг к другу, что между ними остаются только зазоры, вызванные второй причиной. А так как разнотолщинность слоев, вырезанных из листов одной партии проката, имеет одни и те же статистические характеристики, то при давлении выше P_a процесс сжатия пакета не зависит от последовательности сборки слоев.

На основе экспериментально наблюдаемой картины взаимодействия слоев (фиг. 1, 2), в которой по мере сжатия появляются новые области межслойных контактов (т. е. области как бы сближаются), построим модель одномерного упругого сжатия многослойного пакета давлением, распределенным равномерно по обеим лицевым поверхностям.

Рассмотрим систему случайных точек — середин контурных областей контакта между двумя соседними слоями. Статистические свойства этой системы точек можно характеризовать единственной величиной размерности длины — средним расстоянием между точками и совокупностью безразмерных статистических характеристик.

Основное предположение предлагаемой модели состоит в следующем: в большом интервале давлений, начинающемся с порогового давления P_a , процесс сжатия многослойных пластин близок к автомодельному. Гипотеза об автомодельности означает, что в ходе процесса сжатия изменяется (уменьшается) только среднее расстояние между точками системы, а безразмерные статистические характеристики остаются неизменными; уменьшаются только размеры межслойных зазоров, а геометрическая форма зазоров остается неизменной.

Первое означает, что геометрическая картина расположения точек на более поздней стадии процесса в некоторой части пакета (размер которой много больше среднего расстояния между точками) представляет собой (в статистическом смысле) уменьшенную копию картины в большей части пакета на более ранней стадии.

Второе поясним на фиг. 4 (здесь заштрихованы части соседних слоев). На фиг. 4, а слои сжаты давлением P_1 , на фиг. 4, б — давлением P_2 , причем $P_1 < P_2$. При изменении давления от P_1 до P_2 точки контакта A и B смещаются в A_1 и B_1 соответственно. При этом форма зазора между A и B подобна форме зазора между A_1 и B_1 .

Проведенное модельное описание процесса сжатия пакета во многом аналогично описанию процесса накопления точечных дефектов в образце при усталостных испытаниях [9]. Поэтому некоторые дальнейшие выкладки будут аналогичны выкладкам этой работы, хотя и отличаются от них по физическому смыслу.

2. Вывод основных формул. Пусть l — среднее расстояние между точками контакта при давлении на пакет P . Из предположения подобия следует, что отношение средних расстояний между точками контакта при давлении на пакет P_1 и давлении на него P_2 зависит только от отношения P_2/P_1 :

$$l(P_2)/l(P_1) = f(P_2/P_1), \quad P_2 \geq P_1 \geq P_a \quad (2.1)$$

Из (2.1) следует, что при некотором давлении на пакет P_3 выполнены равенства $l(P_3)/l(P_2) = f(P_3/P_2)$, $l(P_3)/l(P_1) = f(P_3/P_1)$. Отсюда получаем уравнение $f(y)/f(x) = f(y/x)$, где $y = P_3/P_1$, $x = P_2/P_1$. Из решения этого уравнения (см. [9, 13]) следует, что f — степенная функция (α — некоторая положительная постоянная):

$$f(x) = x^{-\alpha} \quad (2.2)$$

Из второго предположения о характере рассматриваемого процесса следует, что расстояние между берегами соседних слоев также меняется по закону $t(P)/t(P_1) = f(P/P_1)$, $P \geq P_1 \geq P_a$. Отсюда с учетом (2.2) получаем выражение для объема зазоров V_p в единице объема пакета

$$V_p(P) = t(P)/h = V_p(P_1) (P/P_1)^{-\alpha}, \quad P \geq P_1 \geq P_a \quad (2.3)$$

Здесь учтено, что величина t много меньше толщины слоя h .

Прирост поперечной деформации пакета $d\varepsilon$ складывается из приростов деформаций за счет сжатия собственно материала слоев $d\varepsilon^0$ и изменения объемов зазоров dV_p :

$$d\varepsilon = dP/E_1^h(P) = d\varepsilon^0 - dV_p = dP/E^0 - dV_p$$

Здесь E_1^h — касательный модуль упругости пакета, E^0 — модуль Юнга материала слоев. Отсюда с учетом (2.3) получаем следующее выражение для E_1^h как функции от P :

$$(E_1^h)^{-1} = (E^0)^{-1} + \alpha V_p(P_1) P_1^{-\alpha} P^{-(\alpha+1)}, \quad P \geq P_1 \geq P_a \quad (2.4)$$

После интегрирования выражения (2.4) получаем выражение для поперечной деформации пакета ε :

$$\varepsilon(P) = \varepsilon_0 + V_p(P_1) [1 - (P/P_1)^\alpha] + (E^0)^{-1} (P - P_1) \quad (2.5)$$

где ε_0 — начальная деформация пакета, т. е.

$$\varepsilon_0 = \varepsilon(P_1) = \int_0^{P_1} (E_1^h)^{-1} dP$$

Таким образом, в предлагаемой модели влияние неправильностей геометрической формы слоев на рассматриваемый процесс (в установившейся стадии) учитывается с помощью трех параметров: ε_0 , $V_p(P_1)$ и α .

3. Экспериментальные исследования. Были испытаны квадратные металлослойные пакеты площадью 870 и 900 см², которые различались количеством, толщиной и порядком следования слоев проката. Средние толщины слоев были равны 2,25, 2,9, 5,8 и 11,88 мм. Слои толщиной 2,25 мм были предварительно погнуты. Слои остальных толщин брались в состоянии поставки.

Испытания проводились на 500-тонном прессе ПММ-500 с плавающим столом. Шаг нагрузки был равен 0,2 МН, максимальная нагрузка 4,8 МН, т. е. давление на пакеты достигало значений рабочих давлений в реальных многослойных сосудах³.

³ См. указ публ. с. 105.

Для сравнения результатов эксперимента с формулой (2.4) необходимо задать параметры $V_p(P_1)$ и α . Величину $V_p(P_1)$, вообще говоря, можно измерить экспериментально с помощью пневматического метода [5]. Так как такие исследования отсутствуют, то при построении кривых (2.4) величину $V_p(P_1)$ для каждого фиксированного значения α можно определять по формуле

$$V_p(P_1) = \{ [u(m\Delta P) - u(\Delta P)] (Nh)^{-1} - \Delta P(m-1)(E^0)^{-1} \} (1-m^{-\alpha})^{-1} \quad (3.1)$$

Здесь N — число слоев в пакете, u — средние показания индикаторов на соответствующем шаге нагрузки, m — заранее зафиксированный номер шага нагрузки (ниже кривые построены при $m=20$), $\Delta P=2,2$ МПа — шаг давления, $P_1=\Delta P$.

Заметим, что формула (2.4) не описывает следующий экспериментальный факт (полученный из экспериментов по сжатию многослойных резиновых пакетов [10]): при достаточно высоких давлениях поперечный модуль пакета выходит на постоянное значение, меньшее модуля материала слоев.

Это явление можно объяснить тем, что с ростом давления процесс отходит от автомоделльного, т. е. перестают образовываться новые точки контакта.

Учтем этот факт при минимальном изменении вида формулы (2.4). Введем еще параметр c , характеризующий предельное постоянное значение касательного модуля, и изменим формулу (2.4) следующим образом:

$$(E_1^h)^{-1} = (cE^0)^{-1} + \alpha V_p(P_1) P_1^\alpha P^{-(\alpha+1)}, \quad P \geq P_1 \geq P_a \quad (3.2)$$

Сравнение формулы (3.2) с экспериментом показало, что наблюдается достаточно хорошее их согласие для всех пакетов со слоями проката в состоянии поставки при постоянных значениях $\alpha=0,3$ и $c=0,4$

На фиг. 5 сплошными линиями 1-4 обозначены кривые зависимости (3.2) при различных значениях параметров, а точками — значения величин, полученные из эксперимента ($E^0=2,1 \cdot 10^5$ МПа).

Кривая 1 соответствует пакету площадью 870 см² с $h=2,25$ мм. Кривые 2-4 соответствуют пакетам площадью 900 см² и h , равной 5,8, 11,88, 2,9 мм соответственно. При этом были приняты следующие значения параметров $V_p(P_1)$: 1- $15,3 \cdot 10^{-3}$; 4- $3 \cdot 10^{-3}$; 2- $6,5 \cdot 10^{-3}$; 3- $3,9 \cdot 10^{-3}$.

Формула (3.2) для пакета с предварительно погнутыми слоями (при $\alpha=0,3$; $c=0,4$) дает хорошее количественное согласие с экспериментом лишь до седьмой точки нагружения (т. е. до давления 15,4 МПа), при более высоких давлениях она дает заниженную жесткость (кривая 1). Для пакетов со слоями, изготовленными из листов проката в состоянии поставки, формула (3.2) (при тех же α и c) дает хорошее согласие с экспериментом и при высоких давлениях (кривые 2-4).

Из сравнения с экспериментом также следует, что формула для поперечной деформации, которую с учетом (3.2) следует переписать в виде

$$\varepsilon(P) = \varepsilon_0 + V_p(P_1) [1 - (P_1/P)^\alpha] + (cE^0)^{-1}(P - P_0), \quad P \geq P_1 \geq P_a \quad (3.3)$$

отражает основные закономерности рассматриваемого процесса и ее можно использовать для предсказания хода деформирования реальных многослойных пакетов.

4. Эффективные упругие характеристики пакета. Рассмотрим сложное напряженное состояние в многослойном пакете. При этом считается, что в пакете по нормали к слоям не возникает растяжение; отсутствует проскальзывание между слоями; при сжатии вдоль слоев не происходит потери их устойчивости, т. е. нет расслоения.

При рассмотрении многослойных тел будем использовать аппарат, разработанный для описания деформативных свойств тел с изолированными трещинами, полостями и жесткими неоднородностями [10, 11].

Пусть в представительном элементе объема V сплошного тела содержится $N-1$ неоднородность. Рассмотрим усредненные по объему V тензоры напряжений $\langle \sigma_{ij} \rangle$ и деформаций $\langle \varepsilon_{kl} \rangle$. Материалы тела и неоднородностей линейно упруги с тензорами упругих жесткостей C_{ijkl}^0 и C_{ijkl}^1 соот-

ветственно.

Для не заполненных сильно сплюснутых неоднородностей $C_{ijkl}^1 = 0$ компоненты единичного вектора нормали n_i к поверхности неоднородности S_m постоянны и справедлива формула [11]:

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \varepsilon_{ij}^0 + \frac{1}{2V} \sum_{m=1}^{N-1} (n_i B_j + n_j B_i) \quad (4.1)$$

где ε_{ij}^0 — тензор средних деформаций материала, связанных с тензором напряжений $\langle \sigma_{ij} \rangle$ через тензор податливостей материала A_{ijkl}^0 , обратный к C_{ijkl}^0 ; B_i — проинтегрированный по поверхности полости вектор скачка смещений u_i , т. е.

$$B_i = \int_{S_m} (u_i^+ - u_i^-) dS$$

Здесь и далее величины, помеченные нулем, относятся к материалу, плюсом и минусом — к верхнему и нижнему берегам полости. Будем рассматривать только осредненные компоненты тензоров и при их написании опускать скобки.

В случае физически нелинейного процесса деформирования можно рассматривать малые приращения тензора напряжений, по отношению к которым связь с малыми приращениями тензора деформаций линейна и с использованием симметричной матрицы связи $\|a^{jk}\| = (a_{ij}^k)$ ($i, j = 1, \dots, 6$) имеет вид

$$(\delta \varepsilon) = \|a^{jk}\| (\delta \sigma) \quad (4.2)$$

Здесь $(\delta \varepsilon)$ — столбец $(\delta \varepsilon_{11}, \delta \varepsilon_{22}, \delta \varepsilon_{33}, \delta \varepsilon_{13}, \delta \varepsilon_{23}, \delta \varepsilon_{12})$, $(\delta \sigma)$ — столбец $(\delta \sigma_{11}, \delta \sigma_{22}, \delta \sigma_{33}, \delta \sigma_{13}, \delta \sigma_{23}, \delta \sigma_{12})$.

Упругие касательные характеристики a_{ij}^k зависят не только от вида напряженного состояния, но и от закономерности изменения объема полостей.

В случае нелинейного деформирования тел с полостями справедлива формула⁴, следующая из (4.1):

$$\delta \varepsilon_{ij} = \delta \varepsilon_{ij}^0 + \frac{1}{2V} \sum_{m=1}^{N-1} (n_i \delta B_j + n_j \delta B_i) \quad (4.3)$$

Если все полости в теле параллельны, например плоскости Ox_1x_2 декартовой системы координат $Ox_1x_2x_3$, то в формуле (4.3) следует положить $n_1 = n_2 = 0$, $n_3 = 1$. Отсюда следует, что при любом виде напряженного состояния в таком теле

$$\delta \varepsilon_{11} = \delta \varepsilon_{11}^0, \delta \varepsilon_{22} = \delta \varepsilon_{22}^0, \delta \varepsilon_{12} = \delta \varepsilon_{12}^0 \quad (4.4)$$

Сопоставив выражения связи с приращениями тензора напряжений для левых и правых частей равенств (4.4), получим

$$\begin{aligned} a_{11}^k &= a_{11}^0, a_{12}^k = a_{13}^k = a_{23}^k = a_{12}^0, a_{22}^k = a_{11}^0, a_{66}^k = (a_{11}^0 - a_{12}^0) \\ a_{14}^k &= a_{15}^k = a_{16}^k = a_{24}^k = a_{25}^k = a_{26}^k = a_{36}^k = a_{46}^k = a_{56}^k = 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Проинтегрировав выражение (4.2) с учетом (4.5), получим выражение для связи между напряжениями и деформациями в теле с изолированными сплюснутыми полостями

$$(\varepsilon) = \|a\| (\sigma) \quad (4.6)$$

где (ε) — столбец $(\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{12})$, (σ) — столбец $(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{13}, \sigma_{23}, \sigma_{12})$, $\|a\| = (a_{ij})$ ($i, j = 1, \dots, 6$) — симметричная матрица связи, компо-

⁴ Коваленко Ю. Ф. Эффективные характеристики тел с изолированными газонаполненными трещинами. Волна разрушения: Препринт № 155. М.: Ин-т проблем механики АН СССР, 1980. 52 с.

ненты которой удовлетворяют соотношениям, аналогичным соотношениям (4.5).

При выводе формулы (4.1) и соответственно (4.2) использована формула Гаусса — Остроградского, поэтому полость должна быть замкнутой и может быть неодносвязной. Поэтому если считать, что зазор между соседними слоями есть одна полость (замыкающаяся только на границе рассматриваемого представительного элемента объема V), связность которой по мере сжатия увеличивается, то для пакета с N слоями будут справедливы формулы (4.3) и (4.6).

Из условия существования упругого потенциала $\partial \varepsilon_{ij} / \partial \sigma_{kl} = \partial \varepsilon_{kl} / \partial \sigma_{ij}$ и соотношения (4.6) следует, что упругие секущие характеристики a_{33} , a_{34} , a_{35} , a_{44} , a_{45} , a_{55} являются функциями только компонент σ_{13} , σ_{23} , σ_{33} и параметров, характеризующих геометрию берегов зазоров.

В частности, в п. 3 было показано, что в случае, когда $\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$, в пакете при достаточном сжатии параметры начальных неправильностей сводятся к ε_0 , $V_p(P_1)$, α , c , а характеристику a_{33} можно найти с помощью формулы (3.3). При этом параметры $V_p(P_1)$, α , c , характеризующие податливость тела на установившемся этапе процесса сжатия, являются постоянными для пакетов, изготовленных из листов одной партии проката.

В многослойной сфере или цилиндре, нагруженных внутренним давлением, выполнено тождество $\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$, поэтому характеристика a_{33} будет зависеть от тех же четырех параметров, что и плоский пакет. Методика определения параметра ε_0 у предварительно ненапряженных сфер и цилиндров изложена в [5]. Если же слои у такого сосуда изготовить из листов той же партии, что и у плоского пакета, то значения параметров $V_p(P_1)$, α , c у них будут совпадать.

Автор благодарит В. Д. Ключникова, Р. Л. Салганика, Ю. Ф. Коваленко и А. Г. Хованского за полезные замечания к работе, а также И. Д. Грудева и В. А. Мазура за помощь в выборе методики проведения эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многослойные сварные конструкции и трубы: Материалы I Всесоюз. конф. Киев: Наук. думка. 1984. 391 с.
2. Жукова В. Н., Пимштейн П. Г. Температурные напряжения в многослойных сосудах высокого давления с учетом особенностей на границах контакта слоев // Хим. и нефт. машиностроение. 1977. № 1. С. 11—13.
3. Ильин Л. А., Лобкова Н. А., Нехотлячий В. А., Стариков Н. П. Исследование напряженно-деформированного состояния многослойной рулонированной стенки // Хим. и нефт. машиностроение. 1979. № 9. С. 10—12.
4. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. I. Малые деформации. М.: Наука. 1984. 596 с.
5. Бородич Ф. М. Описание процесса упругого деформирования слоев в многослойных металлических пакетах и сосудах // Проблемы прочности. 1984. № 10. С. 83—85.
6. Бородич Ф. М. Об определении поперечного эффективного модуля упругости многослойного металлического пакета // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1982. № 3. С. 52—55.
7. Грудев И. Д., Бородич Ф. М. Эффективные упругие характеристики многослойных сред с малыми начальными неправильностями в слоях // Механика неоднородных структур: Тез. докл. 1-й Всесоюз. конф. Киев: Наук. думка. 1983. С. 64—65.
8. Тупицын А. А., Пимштейн П. Г., Борсук Е. Г., Цвик Л. Б. Об аппроксимирующей функции сближения шероховатых контактирующих поверхностей в многослойных конструкциях // Изв. вузов. Машиностроение. 1983. № 12. С. 2—9.
9. Баренблатт Г. И., Богвина Л. Р. Автомодельность усталостного разрушения: Накопление повреждений // Изв. АН СССР. МТТ. 1983. № 4. С. 161—165.
10. Вавакин А. С., Салганик Р. Л. Эффективные упругие характеристики тел с изолированными трещинами, полостями и жесткими неоднородностями // Изв. АН СССР. МТТ. 1978. № 2. С. 95—107.
11. Вавакин А. С., Салганик Р. Л. Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями // Изв. АН СССР. МТТ. 1975. № 3. С. 65—75.
12. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия. 1971. 216 с.
13. Баренблатт Г. И. Подobie, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеоиздат. 1978. 206 с.

Москва

Поступила в редакцию
11.VI.1985.