ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտություններ սերիա XXXIII. № 6, 1980 Серия технических наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Г. Л. ПЕТРОСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОВАНИЯ СЛОИСТОПОРИСТЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ

Слоистопористые биметаллические трубы (тепловые трубы) широко используются в различных отраслях современной техники в качестве теплопередающих элементов [1]. Тепловые трубы можно получить, используя различные технологические процессы, наиболее производственными из которых являются прессование и волочение труб (рис. 1) через коническую матрицу [2].

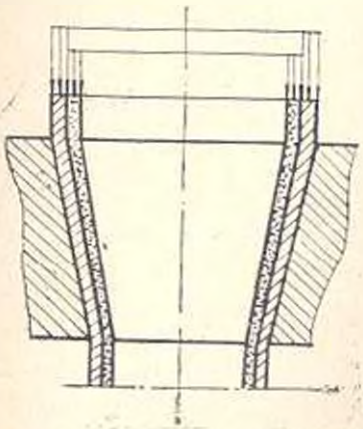

Рис. 1. Схема прессования слоистопористой биметаллической трубы.

Для получения необходимых свойств и размеров изделий, а также для расчета силовых параметров формования, необходимо исследовать напряженно-деформированные состояния тепловых труб.

При формовке между слоями трубы возникает контактное давление, которое зависит от свойств материалов слоев и определяется из условий контакта между ними. Рассмотрим два предельных случая контакта слоев трубы.

1. *Имеется скольжение между слоями трубы.* Исследованию напряженно-деформированного состояния внешнего беспористого слоя посвящена работа [3]. Уравнения, позволяющие исследовать напряженно-деформированное состояние беспористого слоя трубы, имеют следующий вид [3]:

$$\frac{d\psi}{dR} = \frac{1}{4R\cos^2\left(\psi - \frac{\pi}{6}\right)}\left\{2\sqrt{3}\left|1 + \frac{f\delta_1 \operatorname{ctg}\alpha}{(2R + \delta_1\cos\alpha)\cos\alpha}\right| - \right.$$

$$- \frac{2\sqrt{3}\,p_R}{\sigma_i \sin 2\alpha}\left|(\sin 2\alpha + f)\sin\alpha + \sqrt{3}\,f\cos\alpha\right| + \frac{4f\sigma_1 \operatorname{ctg}\alpha \sin 2\psi}{(2R + \delta_1\cos\alpha)\cos\alpha} +$$

$$\left. + 4\cos\left(\psi + \frac{\pi}{3}\right)\frac{1}{\sigma_i}\frac{d\sigma_i}{d\bar{\varepsilon}_i}\right\} + \frac{\sqrt{3}}{2\sigma_i\cos\left(\psi - \frac{\pi}{6}\right)}\frac{dp_R}{dR}; \qquad (1)$$

$$\frac{d\delta_1}{dR} = -\frac{\delta_1 \sin\psi}{R\cos\left(\psi - \frac{\pi}{6}\right)}; \qquad (2)$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}_i}{dR} = \frac{1}{R\cos\left(\psi - \frac{\pi}{6}\right)}; \qquad (3)$$

$$d\varepsilon_{\theta 1} = d\bar{\varepsilon}_i \cos\left(\psi - \frac{\pi}{6}\right); \qquad d\varepsilon_{m1} = d\bar{\varepsilon}_i \sin\left(\psi - \frac{\pi}{3}\right); \qquad (4)$$

$$\sigma_{m1} = -p_R - \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_i \cos\left(\psi + \frac{\pi}{3}\right);$$

$$\sigma_{\theta 1} = -p_R + \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_i \cos\left(\psi - \frac{\pi}{3}\right); \qquad (5)$$

$$p_n = p_R - \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_i \cos\left(\psi - \frac{\pi}{3}\right)\frac{2\delta_1\cos\alpha}{2R + \delta_1\cos\alpha}, \qquad (6)$$

где ψ — подлежащая определению неизвестная функция; α — угол между осью конической матрицы и его образующей; f — коэффициент трения; $\sigma_{R1} = -p_R$, σ_{m1}, $\sigma_{\theta 1}$ — соответственно, радиальное, меридиональное и окружное напряжения; σ_i — интенсивность напряжений; $d\varepsilon_{\theta 1}$, $d\varepsilon_{m1}$ — приращения окружной и меридиональной деформаций беспористого слоя трубы; $d\bar{\varepsilon}_i$ — интенсивность приращений пластических деформаций; p_n — интенсивность нормальных сил, возникающих между матрицей и трубой; δ_1 — толщина стенки беспористого слоя трубы; R — радиус окружности внутренней поверхности беспористого слоя трубы в сечении, перпендикулярном ее оси.

Радиус R определяется в зависимости от геометрии канала матрицы и размеров беспористого слоя трубы по формуле:

$$R = R_1 - (h - z)\operatorname{tg}\alpha - \frac{\delta_1}{\cos\alpha}, \qquad (7)$$

где R_1 — радиус входной части матрицы; h — высота конической части матрицы; z — расстояние текущего сечения радиуса R от выходной части матрицы.

Напряженно-деформированное состояние внутреннего пористого слоя трубы исследуется по методике [4]. Используя уравнения равновесия элемента, вырезанного главными сечениями осесимметрично нагруженной безмоментной оболочки вращения, зависимости деформаций [5] и уравнений теории пластичности пористых материалов [6, 7], получаем:

$$\frac{d\sigma_{m2}}{dR} = \frac{(1 + f\operatorname{ctg}\alpha)\,|(1 - 2\gamma^m)\,\sigma_{m2} - Q|}{2R\,(1 + \gamma^m)} -$$

$$- \frac{\sigma_{m2}\,|3\,(1 - 2\gamma^m)\,\sigma_{m2} + (1 + 4\gamma^m)\,Q|}{2RQ(1 + \gamma^m)}; \qquad (8)$$

$$\frac{d\delta_2}{dR} = \frac{\delta_2(3\sigma_{m2} - Q)\,(1 - 2\gamma^m)}{2RQ(1 + \gamma^m)}; \qquad (9)$$

$$\frac{dv}{dR} = - \frac{69\gamma^m\,(1 - v)\,(3\sigma_{m2} - Q)}{2RQ(1 + \gamma^m)}; \qquad (10)$$

$$\frac{d\bar{\varepsilon}_{экв.}}{dR} = - \frac{2\beta^{1n}\sigma_{экв.}}{RQ}; \qquad (11)$$

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{(1 - 2\gamma^m)\,\sigma_{m2} - Q}{2\,(1 + \gamma^m)}, \qquad (12)$$

где $Q = \sqrt{4\beta^{2n+1}(1 + \gamma^m)\,\sigma^2_{экв.} - 3\,(1 + 4\gamma^m)\,\sigma^2_{m2}}$; σ_{m2}, $\sigma_{\theta 2}$ — соответственно, меридиональное и окружное напряжения пористого слоя трубы; δ_2 — толщина стенки; $\sigma_{экв.}$ — эквивалентное напряжение; $d\bar{\varepsilon}_{экв.}$ — эквивалентное приращение пластических деформаций; n, m — постоянные для материала; γ и β — функции v-пористости материала [4]:

при $0 \leqslant v \leqslant 0{,}25$ — $\gamma = 0.15\,(v)^{0.6}$; $\beta = 1 - 1{,}8v^{0.9}$;

при $0{,}25 \leqslant v \leqslant 0{,}6$ — $\gamma = 0{,}0185 + 0{,}183v$, $\beta = 0{,}73 - v$. (13)

Для определения контактного давления p_R используем второе уравнение равновесия трубы [5]. Имеем:

$$p_R = \frac{\sigma_{\theta 2}\,\delta_2 \cos\alpha}{R}. \qquad (14)$$

При интегрировании уравнения (1) необходимо иметь отношение $\frac{dp_R}{dR}$, которое определяется дифференцированием (14) по R. Получаем:

$$\frac{dp_R}{dR} = \frac{\sigma_{\theta 2}\delta_2 \cos\alpha}{R^2} - \frac{\sigma_{\theta 1}\cos\alpha}{R}\frac{d\delta_2}{dR} - \frac{\delta_2\cos\alpha}{R}\left\{\frac{m\gamma^{m-1}}{1+\gamma^m}\left[\frac{3\sigma_{m2}^2}{Q} - \right.\right.$$

$$\left. - \frac{(1-2\gamma^m)\sigma_{m2} - Q}{2(1+\gamma^m)} - \sigma_{m2} - \frac{\beta^{2n+1}\sigma_{\text{экв.}}^2}{Q}\right]\frac{d\gamma}{dR} -$$

$$- \frac{(2n+1)\beta^{2n}\sigma_{\text{экв.}}^2}{Q}\frac{d\beta}{dR} - \frac{2\beta^{2n+1}\sigma_{\text{экв.}}}{Q}\frac{d\sigma_{\text{экв.}}}{d\bar{\varepsilon}_{\text{экв.}}}\frac{d\bar{\varepsilon}_{\text{экв.}}}{dR} +$$

$$\left. + \frac{1}{2(1+\gamma^m)}\left[1 - 2\gamma^m + \frac{3(1+4\gamma^m)\sigma_{m2}}{Q}\right]\frac{d\sigma_{m2}}{dR}\right\}. \qquad (15)$$

Таким образом, получаем систему семи дифференциальных уравнений (1)—(3), (8)—(11) относительно ψ, δ_1, ε_i, σ_{m2}, δ_2, v и $\varepsilon_{\text{экв.}}$.

Значение функции ψ_1 при $z = h$ $(R = R_1)$ определим из уравнения $d\varepsilon_{m1} = d\varepsilon_{m2}$ (ввиду прессования жестким пуансоном), которое приводим к виду

$$\frac{\sin\left(\psi_1 - \frac{\pi}{3}\right)}{\cos\left(\psi_1 - \frac{\pi}{6}\right)} = -\frac{3\sigma_{m2}(1+4\gamma^m) + Q(1-2\gamma^m)}{2Q(1+\gamma^m)}. \qquad (16)$$

Решая уравнение (16) относительно ψ_1, будем иметь

$$\psi_1 = \operatorname{arctg}\left(\sqrt{3}\,\frac{1+k_1}{1-k_1}\right) + \pi, \qquad (17)$$

где

$$k_1 = \frac{3\sigma_{m2}(1+4\gamma^m) + Q(1-2\gamma^m)}{2Q(1+\gamma^m)}. \qquad (18)$$

Задаваясь начальными значениями δ_{10}, ε_{i0}, $\varepsilon_{\text{экв}\,0}$, σ_{m20}, δ_{20}, v_0 при $R = R_1$, зная диаграммы деформирования материалов беспористого и пористого слоев трубы, из уравнений (12)—(14), (17) находим γ, β, p_R, $\sigma_{\theta 2}$, ψ_1.

Интегрированием системы уравнений (1)—(3), (8)—(11) вычисляем величины ψ, δ_1, $\int d\bar{\varepsilon}_i$, σ_{m2}, δ_2, v, $\int d\bar{\varepsilon}_{\text{экв.}}$ в различных точках конической части слоистопористой биметаллической трубы. Далее, по формулам (5), (6), (12) и (14) определяем, соответственно, σ_{m1}, $\sigma_{\theta 1}$, p_r, $\sigma_{\theta 2}$ и p_R.

2. *Отсутствует скольжение между слоями трубы.* В этом случае по высоте конической матрицы во всех контактных точках между слоями трубы будет соблюдаться условие $d\varepsilon_{m1} = d\varepsilon_{m2}$. Следовательно, для определения напряжения σ_{m2} вместо дифференциального уравнения (8) используем выражение (16). Решая его относительно σ_{m2}, получаем

$$\sigma_{m2} = -\frac{2\beta^{n-0.5}\sigma_{mz}\sqrt{1-\gamma^m}\,[2k_2(1-\gamma^m)+(1-2\gamma^m)]}{\sqrt{9(1+4\gamma^m)^2+3(1-4\gamma^m)[2k_2(1+\gamma^m)+(1-2\gamma^m)]^2}}, \qquad (19)$$

где

$$k_2 = \frac{\sin\left(\psi - \frac{\pi}{3}\right)}{\cos\left(\psi - \frac{\pi}{6}\right)}. \qquad (20)$$

Отметим, что вычисление по формуле (19) осуществляется после интегрирования системы дифференциальных уравнений (1)–(3), (9)–(11).

Приведем результаты решения числового примера. Для обоих слоев трубы выбираем спеченный материал из медного порошка марки ПМС-1 ($n = 0{,}25$) [8] со следующей аппроксимированной диаграммой деформирования

$$\sigma_{mz} = 175 + 500\left(\int_0^t d\bar{\varepsilon}_{mz}\right)^{0.1} \text{ МПа}. \qquad (21)$$

Принимаем также $m = 1{,}0$, $f = 0{,}08$ и $0{,}1$, $R_1 = 12$ мм, $h = 10$ мм, $\alpha = 14^\circ$ и 30°. Начальная пористость внутреннего слоя трубы выбиралась от 0,1 до 0,6 для различных сочетаний толщин стенок слоев ($\delta_{10}^{max} = 1{,}2$ мм, $\delta_{20}^{max} = 0{,}8$ мм). Интегрирование полученных дифференциальных уравнений произведено числовым методом Рунге-Кутта.

Поскольку задача решается для любых значений σ_{mz0}, то вычисления на ЭВМ проводятся с последовательным изменением значения σ_{mz0}. Условию волочения будет соответствовать $\sigma_{mz0} = 0$.

Анализ числовых результатов показывает, что в обоих случаях контакта между слоев трубы, компоненты напряженно-деформированного состояния внешнего беспористого слоя почти не меняются. Контактные условия оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние внутреннего пористого слоя трубы.

На рис. 2 приведены эпюры изменения толщины стенки (кривые (1), пористости (2), окружных (3) и меридиональных (4) напряжений внутреннего пористого слоя трубы для случая волочения слоистопористой биметаллической трубы ($\sigma_{mz0} = 0$, $f = 0{,}08$, $\alpha = 30^\circ$, $\delta_{10} = 1{,}2$ мм, $\delta_{20} = 0{,}8$ мм). Сплошной линией показаны значения указанных величин при отсутствии скольжения между слоями трубы, штриховой линией — при наличии скольжения между ними. Как следует из графиков, в зависимости от условий контакта между слоями слоистопористой биметаллической трубы получаются трубы с различной толщиной и пористостью внутреннего слоя.

При стремлении начальной толщины внутреннего слоя δ_{10} трубы к нулю компоненты напряженно-деформированного состояния внешнего беспористого слоя стремятся к данным деформирования цилиндрических труб в конических матрицах [5].

Было установлено также, что на величину толщины стенки и пористости внутреннего слоя существенное влияние оказывают их начальные значения, угол матрицы и другие параметры технологического процесса.

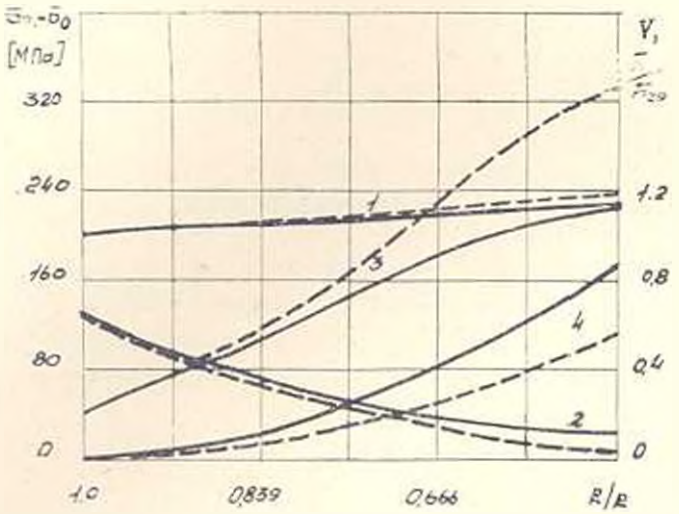

Рис. 2. Эпюры изменения толщины стенки (1), пористости (2), окружных (3) и меридиональных (4) напряжений внутреннего пористого слоя биметаллической трубы при волочении.

Таким образом, для получения слоистопористых биметаллических труб требуемой пористости и толщины стенки внутреннего слоя, расчетным путем можно прогнозировать оптимальные начальные и силовые параметры технологического процесса.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 20. IV. 1980

Ф. Л. ФОСТРОВЯН

ՇԵՐՏԱՎՈՐ ԾԱԿՈՏԿԻՆ ԲՐԿՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՀՆՏԱՁՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Շերտավոր ծակոտկեն երկմետաղական խողովակների անհրաժեշտ հատկություններ, չափսեր ստանալու և նրանց կոնական մատրիցայում ձևավորման ուժային պարամետրերը որոշելու նպատակով հետազոտվել է խողովակների լարվածային և դեֆորմացման վիճակները։ Դիտարկվել է խողովակի շերտերի միջև հպման երկու սահմանային դեպք։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ивановский М. Н., Сорокин В. П., Ягодкин И. В.* Физические свойства тепловых труб. М., «Атомиздат», 1978.
2. *Перлин И. Л.* Теория прессования металлов. М., «Металлургия», 1961.
3. *Петросян Г. Л.* Исследование формования биметаллических круглых стержней с пористым сердечником. «Известия вузов. Машиностроение», 1977, № 6, с. 112—116.
4. *Петросян Г. Л.* Формование пористых труб и стержней. «Доклады АН АрмССР», т. XIV, № 3, 1977, с. 176—181.
5. *Малинин Н. Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. М., «Машиностроение», 1975.
6. *Петросян Г. Л.* О теории пластичности пористых тел. «Известия вузов. Машиностроение», 1977, № 5, с. 10—13.
7. *Петросян Г. Л.* О теории пластичности тел. «Тез. докл. XIX науч.-техн. конф. проф.-преподав. сост. втузов Закавказ. респ.», Тбилиси, 1977, с. 24.
8. *Макукян Н. В., Петросян Г. Л., Погосян М. З.* Диаграмма деформирования пористого материала. «Известия вузов. Машиностроение», 1978, № 3, с. 16—20.