

РАСЧЕТ УСИЛИЯ ВОЛОЧЕНИЯ СВИНЦОВО-ОЛОВЯНИСТОГО ПРИПОЯ С КАНИФОЛЬНЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

Рубаник В.В., Филимонов А.О.,
Княжище А.В.

Свинцово-оловянистый припой представляет собой проволоку из сплава олово-свинец с одним или несколькими каналами, заполненными канифолью. При волочении в зависимости от температурных условий канифоль ведет себя как сыпучее тело или как жидкость. Твердое вещество в сыпучем состоянии не обладает сплошностью, а прерывается на границе каждой отдельной частицы. Основной характерной особенностью сыпучего тела является отсутствие в нем какого-либо сопротивления растягивающим усилиям. Напряжение волочения, являясь растягивающим, воспринимается только оболочкой припоя. В тоже время, величина этого напряжения определяется совместным сопротивлением деформации оболочки и сердечника. Таким образом, при отсутствии сцепления оболочки и сердечника последний выполняет роль податливой оправки для оболочки, увеличивая ее вытяжку. Этой же причиной обусловлена ограниченность сопротивления твердых частиц порошкообразного тела друг относительно друга. Единственной силой, сопротивляющейся сдвигу в структуре порошкообразного тела, является трение твердых частиц друг о друга. Всякое превышение касательного усилия над силой трения неизбежно вызывает внутренние сдвиги в сыпучем теле и разрушение его как устойчивой системы материальных частиц. Полноценным сопротивлением порошкообразное тело обладает только в отношении сжимающих усилий. Сжимающие усилия встречают в порошкообразном теле такое же сопротивление, как и в сплошном, т.к. передача сжимающих усилий происходит через точки взаимного касания частиц друг с другом. Кроме того, многочисленные эксперименты и практика волочения свидетельствуют о том, что между оболочкой и сердечником отсутствует проскальзывание, поскольку сердечник вытягивается совместно с оболочкой, а частицы сердечника перераспределяются вдоль оси волочения. Однако, попытки применить существующие теоретические расчеты для описания процесса волочения оловянно-свинцовой трубки с канифольным наполнением не дала положительного результата. Это обусловлено тем, что при волочении происходит разогрев материала в очаге деформации, который обуславливает поведение канифоли как жидкости. Таким образом, канифоль можно рассматривать как вязкопластичное тело или тело Бингама для которого применима модель ньютоновской жидкости [1]. Из этих соображений можно представить следующую схему действия сил и напряжений при волочении композиционной трубки с канифольным наполнением (рис.1). Для определения напряженно-деформированного состояния композиционной трубки с наполнителем из канифоли выделим кольцевой элемент оболочки толщиной dx_0 и рассмотрим его равновесие. Уравнение равновесия элемента трубки в проекции на ось X имеет вид:

$$\begin{aligned} & (\sigma_{x_0} + d\tau_{x_0})(F_{x_0} + dF_{x_0}) - \sigma_{x_0}F_{x_0} + P_{x_0}\pi D_x \frac{dX_0}{\cos \alpha} \sin \alpha + \\ & + P_{x_0}f_1\pi D_x \frac{dX_0}{\cos \alpha} \cos \alpha - kP_{x_0}\pi d_x \frac{dX_0}{\cos \beta} \sin \beta = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_{x_0} - главное продольное напряжение;

F_{x0} - текущая площадь сечения оболочки;
 D_x, d_x - текущий наружный и внутренний диаметр оболочки;
 P_{x0} - удельное нормальное давление на оболочку со стороны волоки;
 P_{xc} - удельное нормальное давление на оболочку со стороны сердечника;

k - коэффициент равный $\frac{P_{x0}}{P_{xc}}$;

После несложных преобразований и исключения бесконечно малых второго порядка уравнение (1) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_{x0} dF_{x0} + F_{x0} d\sigma_{x0} + P_{x0} \pi D_x \frac{dX_0}{\cos \alpha} \sin \alpha + \\ P_{x0} f_1 \pi D_x \frac{dX_0}{\cos \alpha} \cos \alpha - k P_{x0} \pi d_x \frac{dX_0}{\cos \beta} \sin \beta = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Исключим из уравнения (2) толщину кольцевого элемента трубки dx_0 , воспользуясь ее связью с площадью сечения трубки:

$$F_{x0} = \frac{\pi D_x^2}{4} - \frac{\pi d_x^2}{4}$$

Отсюда

$$dF_{x0} = \frac{\pi}{2} (D_x dD_x - d_x dd_x)$$

Из геометрических соотношений

$$dD_x = 2dX_0 \operatorname{tg} \alpha; \quad dd_x = 2dX_0 \operatorname{tg} \beta,$$

поэтому

$$dF_{x0} = \pi dX_0 (D_x \operatorname{tg} \alpha - d_x \operatorname{tg} \beta) \quad (3)$$

$$dX_0 = \frac{dF_{x0}}{\pi (D_x \operatorname{tg} \alpha - d_x \operatorname{tg} \beta)} \quad (4)$$

Подставляя (4) в уравнение (2), после преобразований имеем:

$$dF_{x0} \left[\sigma_{x0} + P_{x0} \left[\frac{D_x \operatorname{tg} \alpha}{D_x \operatorname{tg} \alpha - d_x \operatorname{tg} \beta} + \frac{f_1 D_x}{D_x \operatorname{tg} \alpha - d_x \operatorname{tg} \beta} - \frac{K d_x \operatorname{tg} \beta}{D_x \operatorname{tg} \alpha - d_x \operatorname{tg} \beta} \right] \right] = -F_{x0} d\sigma_{x0} \quad (5)$$

Текущий внутренний и внешний диаметры трубки приняты соответственно:

$$D_x = \frac{D_0 + D_1}{2}; \quad d_x = \frac{d_0 + d_1}{2} \quad (\text{см. рис. 1})$$

Деформация оловянно-свинцовой трубки с канифольным заполнением протекает с утонением оболочки. Для упрощения задачи примем форму сердечника в очаге деформации в виде конуса с прямолинейной образующей, составляющей с осью волочения угол β , который можно выразить следующим образом [4]:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta d \operatorname{tg} \alpha}{\Delta D - 2(S \pm \Delta t)},$$

где Δd , ΔD - изменение внутреннего и внешнего диаметров композиционной трубки соответственно в процессе волочения;

S - зазор между оболочкой трубки и сердечником до волочения;

Δt - величина абсолютного изменения толщины оболочки на участке безоправочного волочения. В нашем случае $S = 0$ и $\Delta t = 0$, поэтому

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta d}{\Delta D} \operatorname{tg} \alpha$$

В случае установившегося процесса волочения для каждой зоны деформации композиционной трубки отношение наружного диаметра трубки к внутреннему остается величиной постоянной.

Из этого следует, что выражение в квадратных скобках уравнения (5) можно принять постоянной величиной:

$$\frac{D_x \operatorname{tg} \alpha + f_1 D_x - k d_x \operatorname{tg} \beta}{D_x \operatorname{tg} \alpha - d_x \operatorname{tg} \beta} = A = \text{const}$$

Тогда уравнение (5) запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} dF_{x0}(\sigma_{x0} + P_{x0}A) &= -F_{x0}d\sigma_{x0} \\ \frac{dF_{x0}}{F_{x0}} &= -\frac{d\sigma_{x0}}{\sigma_{x0} + P_{x0}A} \end{aligned} \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение (6) решили совместно с уравнением пластичности. Для осесимметричной задачи волочения оно запишется следующим образом [4]:

$$\sigma_{y0} = \gamma \sigma_s - \sigma_{x0}, \quad (7)$$

где σ_{y0} - главное радиальное напряжение в трубке;

σ_s - усредненный предел текучести материала трубки;

γ - коэффициент, учитывающий влияние третьего главного напряжения.

Напряжение можно определить как сумму проекций на ось Y нормального давления на оболочку композиционной трубки со стороны волокна и силы трения между трубой и волоком:

$$\sigma_{y0} = \frac{P_{x0} \cos \alpha - P_{x0} f_1 \sin \alpha}{\cos \alpha} = P_{x0}(1 - f_1 \operatorname{tg} \alpha)$$

Считаем $\sigma_{y0} = P_{x0}$, что для небольших углов наклона волокна и коэффициента трения между волоком и трубкой $f_1 = 0.15$ вполне допустимо [4]. Совместное решение (6) и (7) с учетом $\sigma_{y0} = P_{x0}$ дает:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{x0}}{(A-1)\sigma_{x0} - A\gamma\sigma_s} &= \frac{dF_{x0}}{F_{x0}} \\ \frac{1}{A-1} \ln[(A-1)\sigma_{x0} - A\gamma\sigma_s] &= \ln F_{x0} + C \\ (A-1)\sigma_{x0} - A\gamma\sigma_s &= CF_{x0}^{A-1} \end{aligned} \quad (8)$$

Постоянную интегрирования определим из граничных условий. В плоскости соприкосновения оболочки трубки с сердечником $F_{x0} = F_0$; $\sigma_x = \sigma_s$,

где σ_s - продольное напряжение в оболочке на участке безоправочного волочения композиционной трубки;

F_0 - площадь поперечного сечения оболочки в плоскости соприкосновения с сердечником. Отсюда из (8)

$$C = \frac{\sigma(A-1) - A\gamma\sigma_s}{F_0^{A-1}}$$

Тогда напряжение волочения:

$$\sigma_{\text{во}} = \sigma \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^{A-1} + \frac{\sigma_b \gamma A}{A-1} \left(1 - \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^{A-1} \right) \quad (9)$$

где F_1 - площадь поперечного сечения оболочки на выходе из волоки. В нашем случае $\gamma = 1$ и

$$\sigma_b = 0,$$

тогда

$$\sigma_{\text{во}} = \frac{A \sigma_t}{A-1} \left(1 - \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^{A-1} \right) \quad (10),$$

а усилие волочения $P_{\text{вол}}$ выражается как

$$P_{\text{вол}} = \sigma_{\text{во}} F_1 \quad (11)$$

Экспериментальные исследования проводили на разрывной машине типа ЗТ 10/90. В качестве образца использовали одноканальную припойную проволоку ПОС-61 с 3%-м наполнением канифолью по объему диаметром 8.91мм (см. табл.).

Таблица.

| Маршрут, мм | Обжатие, % | Усилие волочения эксперим., кгс | Рассчитанное усилие волоч., Рв. рас, кгс |
|-------------|------------|------------------------------------|------------------------------------------------|
| 8,91→8,7 | 4,6 | 16 | 17,32 |
| 8,91→8,6 | 5,6 | 23 | 23,8 |
| 8,91→8,0 | 19,4 | 59 | 58,95 |

На основании расчетных данных и данных эксперимента построены графики зависимостей усилия волочения $R_{\text{вол}}$ от единичных обжатий E (рис.2). Усилие волочения, рассчитанное по формуле(11) отличается от экспериментального значения на 5-10% (рис.2), что позволяет рекомендовать данную методику расчета для практического использования в волочильном производстве оловянисто-свинцовых припоев.

Литература:

1. Вялов В.В. Реологические основы механики грунтов. -М.: Высш.школа, 1978.- 447 с.
2. Перлин И.Л. Теория волочения. -М.: Металлургия. 1957.-424с.
3. Производство порошковой проволоки /И.К.Походня, В.Ф.Альтур, В.Н.Члепаков и др. - Киев: Высш.школа, 1980. -232 с.
4. Матвеев .М., Батист А.И. Волочение труб на деформируемом сердечнике. - Челябинск: Южно-Уральское хи.изд-во, 1967.-115с.

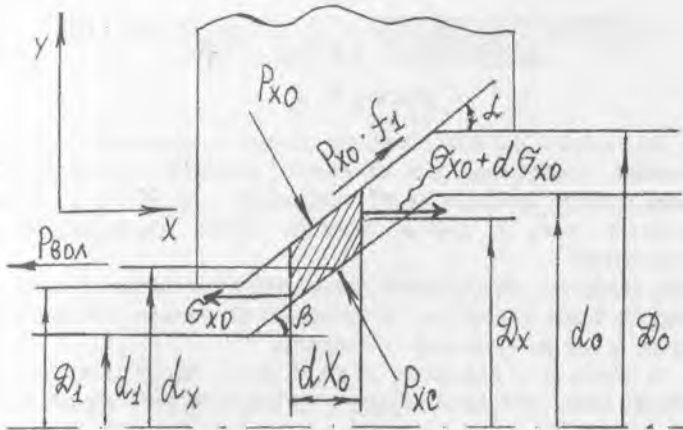
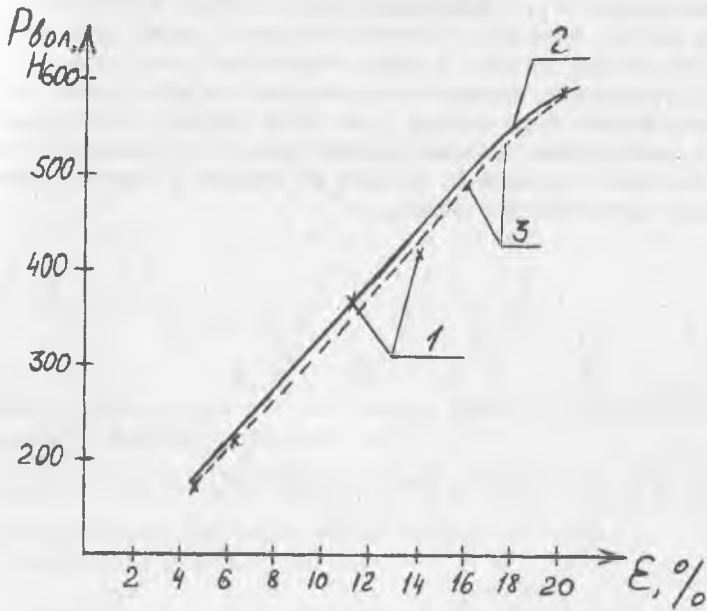


Рис. 1. Схема очага деформации и распределения напряжений при волочении одноканальной трубки с кавифольным заполнением.



- 1 - экспериментальные данные;
 2 - расчетные данные.
 3 - аппроксимация экспериментальных данных.

Рис. 2. Зависимость усилия волочения трубки ПОС-61 от единичных обжатий