

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ УСИЛИЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПЛЮЩЕНИИ ПРОВОЛОК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Папко И. В., Мельник Е. А.

Вышинский Н. В. – к.т.н., профессор

Для изготовления катодных систем мощных генераторных приборов применяют ленту, получаемую методом горячего ультразвукового плющения в вакууме проволок из тугоплавких металлов и сплавов [1]. При ультразвуковом плющении реализуется режим ударного взаимодействия с периодическими нарушениями контакта между обрабатываемой проволокой и инструментами. Взаимодействие инструментов с обрабатываемой проволокой, включая их подведение к проволоке и сам процесс плющения можно разделить на 2 режима: 1-й режим (установочный) – взаимодействие упруго деформируемого инструмента с упруго деформируемой проволокой; 2-й режим (рабочий) – взаимодействие упруго деформируемого инструмента с пластически деформируемой проволокой [2].

Рассмотрим динамику взаимодействия упруго деформируемого инструмента с упруго деформируемой проволокой.

Рассмотрим смещение контактной поверхности инструмента 1 относительно неподвижной системы координат ZOY, начало которой совмещено с центром поперечного сечения деформируемой проволоки 2 (рис. 1). Для выбранной системы координат уравнение, описывающее смещение поверхности инструмента для случая начала его контактирования с проволокой (рис. 1, а), будет иметь вид

$$z = R + A(1 + \sin\omega t), \quad (1)$$

где R – радиус поперечного сечения проволоки; A,  $\omega$  – амплитуда и циклическая частота ультразвуковых колебаний инструмента.

При дальнейшем перемещении инструмента в направлении начала координат наступит режим упругого деформирования проволоки. В последующем будем считать, что величина упругой деформации инструмента при его контактировании с нагретой проволокой намного меньше величины упругой деформации последней и может не учитываться.

Допустим, что проволока упруго деформируется в направлении оси OZ на величину  $u_0$ . Тогда уравнение смещения контактной (калибрующей) поверхности инструмента примет вид

$$z = R \cdot u_0 + A(1 + \sin\omega t) = z_0 + A \sin\omega t, \quad (2)$$

где  $z_0 = A + R - u_0$  – координата, определяющая положение контактной поверхности инструмента при отсутствии колебаний.

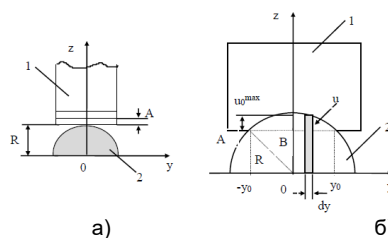


Рис. 1

Величина максимальных упругих деформаций будет зависеть от механических свойств материала проволоки, в частности, от значения предела текучести  $\sigma_{0,2}$ . Упругое деформирование проволоки будет осуществляться при значениях напряжений меньших значения напряжения текучести, т.е.

$$\sigma = E \varepsilon \leq \sigma_{0,2}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости 1-го рода материала проволоки,  $\varepsilon$  – относительная деформация проволоки.

При контактировании цилиндрической проволоки с плоским инструментом (рис. 1, б) относительная деформация отдельных участков проволоки зависит от их положения.

Для участка проволоки, совпадающего с осью OZ, величина относительной деформации может быть определена как отношение максимальной упругой деформации  $u_0^{\max}$  к радиусу проволоки R, т.е.

$$\varepsilon^{\max} = u_0^{\max} / R. \quad (4)$$

Тогда, с учетом (3), получим выражение для максимально допустимой упругой деформации проволоки

$$u_0^{\max} = \sigma_{0,2} R / E. \quad (5)$$

Для определения распределения давлений в зоне контакта инструмента с упруго деформируемой проволокой для момента времени, соответствующего максимальному смещению поверхности инструмента, найдем распределение деформаций в поперечном сечении проволоки (рис. 1, б). Уравнение контура сечения недеформированной проволоки имеет вид

$$z^2 + y^2 = R^2. \quad (6)$$

Упругая деформация распределяется вдоль оси OY в соответствии с зависимостью

$$u = u(y) = z - (R - u_0^{\max}). \quad (7)$$

Учитывая (6), получим

$$u = u_0^{\max} - R + \sqrt{R^2 - y^2}. \quad (8)$$

Найдем для каждого продольного сечения проволоки, проведенного через точку оси ОУ с координатой у, выражение для относительной деформации

$$\varepsilon(y) = u(y)/z(y) = (u_0^{\max} - R + \sqrt{R^2 - y^2})/\sqrt{R^2 - y^2} = 1 + (u_0^{\max} - R)/\sqrt{R^2 - y^2}. \quad (9)$$

Исходя из закона Гука для деформации сжатия с учетом (9) распределение напряжений в материале проволоки в зоне контакта будет иметь вид

$$\sigma(y) = E\varepsilon(y) = E(\sqrt{R^2 - y^2} + u_0^{\max} - R_2)/\sqrt{R^2 - y^2}. \quad (10)$$

Найдем распределение давлений вдоль оси ОУ в зоне контакта инструмента с проволокой. Для этого на расстоянии у от центра сечения проволоки выделим элементарный участок шириной du и длиной l, равной длине контактирующей поверхности инструмента (рис. 1, б). Тогда выражение для элементарного давления, действующего на этом участке, будет иметь вид

$$dp = \sigma(y)l dy = E l (\sqrt{R^2 - y^2} + u_0^{\max} - R) dy / \sqrt{R^2 - y^2}. \quad (11)$$

Выполнив интегрирование выражения (11) с учетом условий на границе участка, где давление равно нулю, т.е.  $p(y_0) = p(-y_0) = 0$ , получим выражение для распределения давления в зоне контактирования проволоки с инструментом

$$p(y) = E l (y \pm y_0 + u_0^{\max} - R) (\arcsin(y/R) - \arcsin(\pm y_0/R)), \quad (12)$$

где верхний знак принимается при рассмотрении распределения давлений для  $y < 0$ , а нижний - для  $y > 0$ . Выражение (12) можно упростить. Учитывая, что для упругой деформации проволоки  $y_0 \ll R$ , можно считать

$$\arcsin(y_0/R) \approx y_0/R \text{ и } \arcsin(y/R) \approx y/R \quad (13)$$

Тогда выражение для давления примет вид (для  $y > 0$ )

$$p(y) = E u_0^{\max} l (y - y_0) / R = E \varepsilon^{\max} l (y - y_0) \quad (14)$$

Значение  $y_0$  можно определить из выражения, составленного для прямоугольного треугольника ОАВ (рис. 1, б).

$$y_0 = \sqrt{2R u_0^{\max} - (u_0^{\max})^2}. \quad (15)$$

Учитывая, что величина упругих деформаций  $u_0^{\max}$  незначительна, в выражении (15) можно пренебречь членом  $(u_0^{\max})^2$  и тогда получим

$$y_0 = \sqrt{2R u_0^{\max}}. \quad (16)$$

Выражение для усилия, необходимого для максимальной упругой деформации проволоки, найдем, проинтегрировав выражение (11) в пределах изменения у от  $-y_0$  до  $y_0 = \sqrt{2R u_0^{\max}}$ . Получим

$$P = 2El(y_0 + (u_0^{\max} - R)\arcsin(y_0/R)) \quad (17)$$

Учитывая (13), (16), выражение (17) для усилия, обеспечивающего максимальную упругую деформацию, можно упростить и оно примет вид

$$P = 2ElR\sqrt{2(\varepsilon^{\max})^3}. \quad (18)$$

Оценим величину максимальных напряжений, возникающих в материале инструмента, при реализации 1-го режима взаимодействия инструмента из сплава ВК8 с вольфрамовой проволокой диаметром 0,1 мм, нагретой до температуры 1273 К.

В соответствии с формулой Герца имеем

$$\sigma_k^{\max} = 0.418\sqrt{qE_n/\rho_n}, \quad (19)$$

где  $E_n = 2E_1E_2/E_1 + E_2$ ;  $1/\rho_n = 1/\rho_1 = 1/\rho_2$ .

Для сплава ВК8 и для вольфрама, нагретого до температуры 1273 К, модули упругости имеют значения, соответственно,  $E_1 = 600 \text{ ГН/м}^2$  и  $E_2 = 368 \text{ ГН/м}^2$ . Радиус кривизны для плоской калибрующей поверхности инструмента равен  $\infty$ . Тогда  $\rho_n = R_2 = 0.5 \times 10^{-4} \text{ м}$ .

Определение удельного давления q

$$q = \mu(y = 0)/l = E_2\varepsilon_2^{\max}y_0. \quad (20)$$

Учитывая, что для вольфрама, нагретого до температуры 1273 К,  $\sigma_{0,2} = 1420 \text{ МН/м}^2$ , будем иметь

$$\varepsilon_2^{\max} = \sigma_{0,2}/E_2 = 1420 \times 10^6 / 368 \times 10^8 = 0,386 \times 10^{-2}.$$

Определим величину  $y_0$

$$y_0 = \sqrt{2R_2U_0^{\max}} = R_2\sqrt{2U_0^{\max}/R_2} = R_2\sqrt{2\varepsilon_2^{\max}} = 0.5 \times 10^{-4}\sqrt{2 \times 0.368 \times 10^{-2}} = 4.4 \times 10^{-6}(\text{м}).$$

Подставив вычисленные значения в выражение (25), получим

$$\sigma_k^{\max} = 0.418\sqrt{qE_n/\rho_n} = 0,418\sqrt{E_2\varepsilon_2^{\max}y_0 2E_1E_2/R_2(E_1 + E_2)} =$$

$$= 0.418\sqrt{368 \times 10^9 \times 0.368 \times 10^{-2} \times 4.5 \times 10^{-6} \times 2 \times 600 \times 368 \times 10^{18} / 0.5 \times 10^{-4} (368 + 600) \times 10^9} = 3200(\text{МПа})$$

Получено значение максимальных контактных напряжений, возникающих в материале инструмента в результате его ударного циклического взаимодействия с упруго деформируемой проволокой. Частота циклического взаимодействия определяется рабочей частотой ультразвуковых колебаний и составляет  $f=30.7 \text{ кГц}$ . Если принять длительность режима упругой деформации проволоки равной, примерно, 3 с, то за это время произойдет около 105 циклов ударного взаимодействия. Разрушение твердого сплава ВК8 при максимальном значении напряжения сжатия  $\sigma_0^{\text{жк}} = 3200 \text{ МПа}$  наступает после  $2 \times 10^6$  циклов ударного взаимодействия, что несколько выше, чем в случае реализации режима упругого взаимодействия инструмента с проволокой. Однако, если учесть, что вследствие наличия трения между движущейся проволокой и инструментом, в материале последнего возникают наряду с вычисленными напряжениями сжатия также и циклические касательные напряжения, то не исключено, что суммарные циклические напряжения вызывают усталостное разрушение контактирующей поверхности инструмента.

Список использованных источников:

1. Боженов В.В., Вышинский Н.В., Кундас С.П., Тявловский М.Д. Высокопроизводительный процесс получения лент из тугоплавких металлов и сплавов - Электронная промышленность, 1983, вып.6(123), с.49-50.
2. Вышинский Н.В. Исследование высокотемпературных процессов при ультразвуковой обработке тугоплавких металлов в вакууме - Известия Белорусской инженерной академии, 1996, вып.1, с.45-47.