

## **ВЫБОР СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СИЛАМИ ВОЛОЧЕНИЯ И ПОДПОРА ПРИ ВИБРОВОЛОЧЕНИИ**

*Проведений аналіз силових умов деформування металу монолітною конічною матрицею. Запропонований спосіб волочіння виробів з матеріалів, що важко деформуються.*

**Ключові слова:** *волочіння, деформування, проштовхування, протікання металу, осередок деформації.*

*Проведен анализ силовых условий деформирования металла монолитной конической матрицей. Предложен способ волочения изделий из труднодеформируемых материалов.*

**Ключевые слова:** *волочение деформирование, проталкивание, течение металла, очаг деформации.*

**Постановка проблемы.** Основная проблема, стоящая перед теорией и практикой производства заготовок для катодов плазмотронов, режущего инструмента, сварочных электродов и ряда подобных изделий из труднодеформируемых материалов и высоколегированных сталей осуществляемых методами вибрационного деформирования бесконтейнерного прессования (проталкивание) и волочения через монолитные матрицы, является увеличение степени деформации заготовок при минимальных затратах деформирующих усилий и увеличении выхода качественной продукции [1]. Наиболее эффективно это достигается при «силовой или температурной интенсификации процесса». Одним из эффективным методов «силовой интенсификации» является использование виброволочения с подпором. Даже при минимальных давлениях подпора практически исключается брак, связанный с разрывом заготовок и значительно снижаются тянущие усилия.

**Анализ достижений и публикаций.** Известны технические и технологические решения использования волочения с применением вращательных, угловых и поперечных колебаний волокни, проталкивания и волочения прутков и проволоки с применением продольных колебаний (с циклическим подпором, с пульсирующим противонапряжением), ступенчатого вибрационного деформирования (двухступенчатое, трехступенчатое) [2]. Основываясь на полученных М.Г. Цейтлиным данных, Т.М. Голубев, и Г.П. Дяченко определили условия, при которых достигается снижение силы волочения при использовании вращательных ко-

лебаний волоки низкой частоты. При циклическом подпоре решены вопросы выбора кинематических и временных параметров подпора. Силовые характеристики данного процесса ранее не рассматривались.

**Цель работы.** Определить соотношение между проталкивающей и тянущей силами при виброволочении.

**Материал исследования.** Основываясь на общности физической сущности пластического течения металла через матрицу при волочении и проталкивании, рассмотрим условия деформирования металла монолитной конической матрицей под одновременным действием тянущей  $P_1$  и проталкивающей  $P_0$  сил, приложенных к прутку. Процессы волочения ( $P_0 = 0$ ) и проталкивания ( $P_1 = 0$ ) будут представлять собой частные случаи этого комбинированного процесса. Для определения сил  $P_0$ ,  $P_1$  воспользуемся энергетическим методом с использованием полей кинематически допустимых скоростей, с учетом колебаний во времени скорости деформирования [1].

На рисунке 1 представлен деформируемый прут, разделенный на четыре зоны, в каждой из которых поле скоростей непрерывно. На входе в матрицу и выходе из нее очаг деформации ограничен поверхностями  $S_0$  и  $S_1$ , на которых имеют место разрывы непрерывности скорости. Учитывая, что применяемые на практике углы рабочего конуса матрицы весьма малы, а применение вибрации создает предпосылки для их дальнейшего уменьшения, потери на разрывах скоростей не будем учитывать.

Очаг деформации, изображенный на рисунке 1, представим состоящим из двух зон. В зоне I деформируемый металл находится в состоянии трехосного неравномерного сжатия, т.е. в данной зоне происходит процесс прессования. Уравнение пластичности Треска Сен-Венана, для зоны I, с известной степенью приближенности может быть записано в виде  $|\sigma_\theta| - |\sigma_r| = \sigma_S$ , где  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  – соответственно продольное и радиальное главные напряжения, а  $\sigma_S$  – напряжение текучести материала прутка.

Зона II характерна разноименной схемой напряженного состояния, имеющей место при волочении. Для этой зоны  $|\sigma_\theta| + |\sigma_r| = \sigma_S$ .

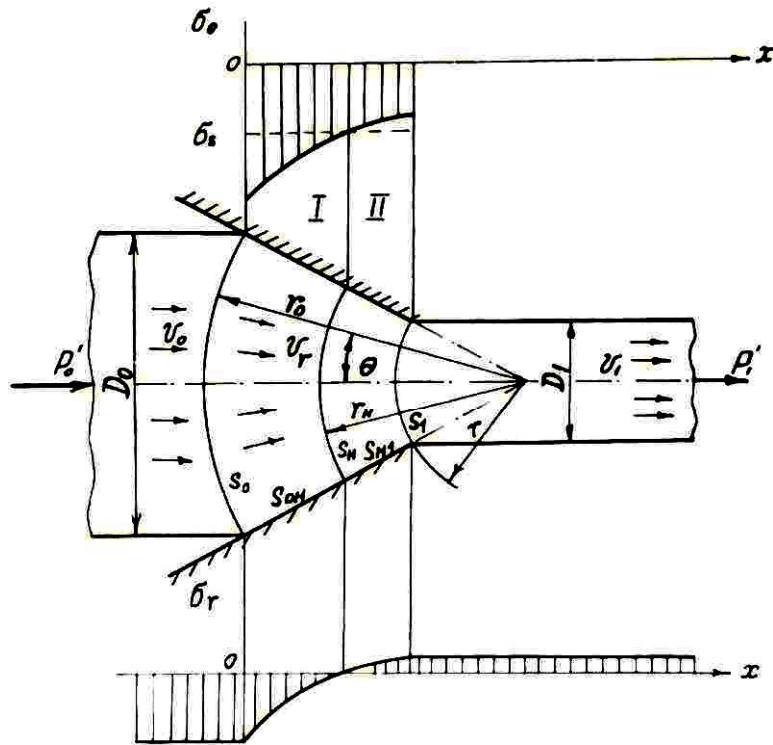


Рисунок 1 – Напряжения в очаге деформации при волочении с подпором

Граница между зонами I и II, соответствующая радиусу-вектору  $r_H$ , представляет собой поверхность, на которой продольное напряжение  $\sigma_r$  равно нулю. Эту поверхность ( $S_H$ ) далее будем называть нейтральной поверхностью.

Баланс мощностей запишем в следующем виде:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4, \quad (1)$$

где  $N = \sum P_i \mathcal{Q}_i$  - мощность активных (рабочих) сил;

$P_i$  - сила, действующая на передний или задний конец прутка с учетом ее знака;

$\mathcal{Q}_i$  - скорость движения соответствующего конца прутка;

$N_1$  - мощность пластической деформации в зоне I прессования с учетом затрат на преодоление инерционных сил;

$N_2$  - мощность сил трения контактной поверхности зоны I;

$N_3$  - мощность пластической деформации в зоне II волочения с учетом потерь на инерционные силы;

$N_4$  - мощность сил трения на контактной поверхности зоны II.

В связи с тем, что продольное напряжение  $\sigma_r$  на поверхности раздела зон I и II равно нулю, представляется возможным составить ба-

ланс мощностей отдельно для каждой из зон, полагая, что в зоне I все внутренние и внешние сопротивления преодолеваются силой проталкивания (подпора)  $P_0$ , а в зоне II – силой волочения  $P_1$ . Тогда уравнение баланса мощности для зоны I следующее:  $P_0 \mathcal{G}_0 = N_1 + N_2$ .

Интегральное уравнение энергии для зоны I имеет вид:

$$\mathcal{G}_0 \iint_{S_0} \sigma_0 dS = \mathcal{G}_0 \iint_{S_0} \sigma_0' dS + \iint_{S_{0H}} \tau_1 \Delta \mathcal{G}_{0H} dS, \quad (2)$$

где  $S_0$  - площадь поперечного сечения прутка у входа в матрицу;

$\sigma_0$  - среднее напряжение подпора;

$\sigma_0'$  - часть напряжения подпора, затрачиваемая на пластическое формоизменение и преодоление инерционных сил;

$\tau_1$  - напряжение контактного трения в зоне I;

$\Delta \mathcal{G}_{0H}$  - приращение скорости скольжения металла по контактной поверхности от входа в очаг деформации до нейтрального сечения  $r_0$ ;

$r_H$  - значения координаты  $r$ , соответствующие входному и нейтральному сечениям очага деформации.

Мощность пластического формоизменения определим, предположив, что деформация в конической зоне является однородной, учитывая инерционные силы, возникающие в очаге деформации в результате колебания во времени скорости деформирования.

Для этого воспользуемся методом решения уравнений движения сплошной среды [3, 4].

В сферической системе координат  $r, \theta, \lambda$  поле скоростей имеет вид:  $\mathcal{G}_r = -\mathcal{G}_r(r), \mathcal{G}_\theta = \mathcal{G}_\lambda = 0$ , где  $\mathcal{G}_r$  - скорость течения в направлении радиуса – вектора  $r$ .

Уравнение неразрывности в выбранной системе координат, в рассматриваемом случае может быть записано следующим образом:

$$\frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r} + 2 \frac{\mathcal{G}_r}{r} = 0. \quad (3)$$

Его общее решение  $\mathcal{G}_r = c / r^2$ . Принимая, что при  $r = r_0, \mathcal{G}_r = -\mathcal{G}_0$ , где  $\mathcal{G}_0$  - скорость входа в матрицу заднего конца полосы, получим  $c = -\mathcal{G}_0 r_0^2$ . Таким образом  $\mathcal{G}_r = -(\mathcal{G}_0 r_0^2) / r^2$ .

Компоненты скоростей деформации в криволинейной ортогональной системе координат [3]:

$$\varepsilon_{q_1 q_1} = \frac{1}{H_1} \frac{\partial \mathcal{G}_{q_1}}{\partial q_1} + \frac{\mathcal{G}_{q_2}}{H_1 H_2} \frac{\partial H_1}{\partial q_2} + \frac{\mathcal{G}_{q_3}}{H_1 H_3} \frac{\partial H_1}{\partial q_3}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{q_1 q_2} = \frac{1}{H_3} \frac{\partial \mathcal{G}_{q_2}}{\partial q_3} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \mathcal{G}_{q_3}}{\partial q_3} - \frac{\mathcal{G}_{q_2}}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_3} - \frac{\mathcal{G}_{q_3}}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2}. \quad (5)$$

Подставив в (5) коэффициенты Ламэ, соответствующие выбранной систем координат, определим скорость деформации:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial \mathcal{G}_r}{\partial r} = 2 \frac{\mathcal{G}_0 r_0^2}{r^3}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\lambda = \frac{\mathcal{G}_r}{r} - \frac{\mathcal{G}_0 r_0^2}{r^3}. \quad (7)$$

Интенсивность скоростей деформации:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_\lambda)^2 + (\varepsilon_\lambda - \varepsilon_r)^2} = 2 \frac{\mathcal{G}_0 r_0^2}{r^2}. \quad (8)$$

Продольное напряжение:

$$\sigma_r = \sigma - 2\mu_i \varepsilon_r, \quad (9)$$

где  $\sigma$  - среднее напряжение.

Коэффициент  $\mu_i$  определим как для идеального пластичного металла  $\mu_i = \frac{\sigma_s}{3\varepsilon_i}$ , полагая истинное напряжение  $\sigma_s$  не зависящим от координаты  $r$  в пределах рассматриваемой зоны очага деформации и равны средне – интегральному значению истинного напряжения для данной зоны.

Из уравнения движения и с учетом (6, 7), получим дифференциальное уравнение для среднего напряжения:

$$-\frac{\partial \sigma}{\partial r} - 2 \frac{\sigma_s}{r} = \rho \frac{r_0^2}{r^2} \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t} + 2\rho \mathcal{G}_0^2 \frac{r_0^4}{r^5}. \quad (10)$$

В уравнении (10) первый член правой части учитывает ту долю среднего напряжения, которая необходима для пластического изменения формы металла; второй член характеризует затраты напряжения на преодоление инерционных сил, возникающих в результате изменения во время скорости  $\mathcal{G}_0$  входа полосы в матрицу; третий член учитывает потери на инерционные силы, имеющие место в результате повышения скорости течения металла от входа матрицы к выходу. В работе [5] Ю.Н. Алексеева показано, что эта составляющая инерционных сил становится соизмеримой с рабочими напряжениями лишь при скоростях волочения порядка сотен м/с, которые на практике не применяются. На этом основании исключим третье слагаемое из уравнения (10). Интегрируя уравнение (10), получим:

$$\sigma = -2\sigma_s \ln r + \rho \frac{r_0^2}{r} \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t} + c. \quad (11)$$

На основании зависимостей (11) и (9) получим формулу для продольного напряжения:

$$\sigma_r = 2\sigma_s \ln \frac{r_H}{r} - \rho r_0^2 \left( \frac{1}{r_H} - \frac{1}{r} \right) \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t}. \quad (12)$$

В формуле (12) первое слагаемое характеризует напряжение основной пластической деформации, а второе слагаемое – инерционные силы, возникающие в результате изменения скорости пластического течения во времени.

Формула (12) является справедливой для всего очага деформации. Напряжение у входа в очаг деформации определим, положив  $r = r_0$ . Приняв  $r = r_1$ , получим продольное напряжение на выходе из очага деформации:

$$\sigma_{r_1} = 2\sigma_{s2} \ln \frac{r_H}{r_1} - \rho r_0^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_H} \right) \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t}. \quad (13)$$

При применяемых на практике углах матрицы (0,1 – 0,15 рад) без большой погрешности можно положить  $\sigma_0 = \sigma_{r_0}$  и  $\sigma_1 = \sigma_{r_1}$ ; тогда мощность пластического формоизменения в зоне I:

$$N_1 = \mathcal{G}_0 \int_{S_0} \sigma_{r_0} dS \quad \mathcal{G}_0 S_0 \left[ 2\sigma_{S1} \ln \frac{r_0}{r_H} - \rho r_0^2 \left( \frac{1}{r_H} - \frac{1}{r_0} \right) \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t} \right]. \quad (14)$$

Мощность пластического формоизменения в зоне II волочения:

$$N_3 = \mathcal{G}_1 \int_{S_1} \sigma_{r_1} dS \quad \mathcal{G}_1 S_1 \left[ 2\sigma_{S2} \ln \frac{r_H}{r_1} - \rho r_0^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_H} \right) \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t} \right]. \quad (15)$$

Потери на контактное трение в очаге деформации будем считать не зависящим от нормального давления, т.е. используем закон трения Э. Зибеля [6]. Тогда для зоны I, полагая, что напряжения трения  $\tau_1$  не зависят от координаты  $r$ , после интегрирования получим:

$$N_2 = 2\pi R_0^2 \mathcal{G}_0 f_1' \sigma_{S1} (\operatorname{ctg} \alpha) \ln \frac{R_0}{R_H}. \quad (16)$$

Суммируя все виды энергетических затрат в зоне I очага деформации и приравняв их мощности, развиваемой проталкивающей силой  $P_0$ , получим согласно (16):

$$P_0 \mathcal{G}_0 = \mathcal{G}_0 S_0 \left[ 2\sigma_{S1} \ln \frac{r_0}{r_H} - \rho r_0^2 \left( \frac{1}{r_H} - \frac{1}{r_0} \right) \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t} \right] + \\ + 2\mathcal{G}_0 S_0 f_1' (\operatorname{ctg} \alpha) \sigma_{S1} \ln \frac{r_0}{r_H}. \quad (17)$$

Аналогично для зоны II:

$$P_1 \mathcal{G}_1 = \mathcal{G}_1 S_1 \left[ 2\sigma_{S2} \ln \frac{r_H}{r_1} - \rho r_0^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_H} \right) \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t} \right] + \\ + 2\mathcal{G}_1 S_1 f_2' (\operatorname{ctg} \alpha) \sigma_{S2} \ln \frac{r_H}{r_1}. \quad (18)$$

Внешние силы при волочении с подпором:

- сила подпора

$$P_0 = S_0 \left[ 2\sigma_{S1} \ln \frac{D_0}{D_H} (1 + f_1' \operatorname{ctg} \alpha) - \frac{\rho D_0}{2 \sin \alpha} \left( \frac{D_0}{D_H} - 1 \right) \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t} \right]; \quad (19)$$

- тянущая сила

$$P_1 = S_1 \left[ 2\sigma_{S2} \ln \frac{D_H}{D_1} (1 + f_2' \operatorname{ctg} \alpha) - \frac{\rho D_0^2}{2 D_H \sin \alpha} \left( \frac{D_H}{D_1} - 1 \right) \frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t} \right]. \quad (20)$$

При волочении с подпором важнейшей характеристикой процесса является соотношение между напряжениями волочения  $\sigma_1$  и подпора  $\sigma_0$  определяется как  $\sigma_0 = m_\sigma \sigma_1$ , где  $m_\sigma$  - коэффициент, выбираемый из технологических, энергетических и других соображений. Учитывая, что  $\sigma_0 = \frac{P_0}{S_0}$  и  $\sigma_1 = \frac{P_1}{S_1}$ , а также, что среднее за цикл значение  $\frac{\partial \mathcal{G}_0}{\partial t} = 0$ , из (19) и (20) получим:

$$m_\sigma = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} = \frac{\ln \frac{D_0}{D_H} (1 + f_1' \operatorname{ctg} \alpha) \sigma_{S1}}{\ln \frac{D_H}{D_1} (1 + f_2' \operatorname{ctg} \alpha) \sigma_{S2}}. \quad (21)$$

От величины  $m_\sigma$  зависит положение нейтрального сечения очага деформации, определяемое величиной  $D_H$ .

Рассмотрим условия, обеспечивающие максимальную величину энергии, подводимой к очагу деформации через внеконтактные зоны (передний и задний концы обрабатываемой полосы) [7].

Максимальная величина напряжения, которое может быть приложено к переднему концу прутка со стороны тянущего органа  $\sigma_{1\max} = \sigma_{S2}$ , где  $\sigma_{S2}$  - напряжение текучести материала прутка после выхода из волоки. Практически процесс деформирования ведут, имея некоторый запас прочности прутка  $K_1$ :  $\sigma_1 = \sigma_{S2} / K_1$ . Тянущая сила в этом случае равна  $P_1 = \sigma_{S2} S_1 / K_1$ . Максимальная величина напряжения, которое может быть приложено к заданному концу прутка с учетом необходимого запаса устойчивости  $\sigma_0 = \sigma_{S1} / K_0$ , а сила подпора  $P_0 = \sigma_{S1} S_0 / K_0$ , где  $\sigma_{S1}$  - предел текучести материала прутка до входа в волоку;  $K_0$  - коэффициент запаса устойчивости.



Значение коэффициентов запаса  $K_0$ ,  $K_1$  принимают в зависимости от особенностей технологии. Без большой погрешности можно положить  $K_1 = K_0$ . Тогда из  $\sigma_1 = \sigma_{S2} / K_1$  и  $\sigma_0 = \sigma_{S1} / K_0$  получим соотношение между напряжениями волочения и подпора  $m_\sigma = \sigma_0 / \sigma_1 = 1 / C$ , где  $C = \sigma_{S2} / \sigma_{S1}$  - коэффициент упрочнения металла. При деформировании в условиях, когда упрочнения не происходит,  $C = 1$  и  $m_\sigma = 1$ . Подставив значение  $m_\sigma = 1$  в формулу (21), имеем:

$$D_H = \sqrt{D_0 D_1}. \quad (22)$$

С учетом (22) получим формулы для определения проталкивающей и тянущей сил при данном режиме:

$$P_0 = S_0 \sigma_S \ln \frac{D_0}{D_1} (1 + f \operatorname{ctg} \alpha); \quad (23)$$

$$P_1 = S_1 \sigma_S \ln \frac{D_0}{D_1} (1 + f \operatorname{ctg} \alpha). \quad (24)$$

В этом случае возможная величина логарифмической деформации вдвое выше, чем при деформировании одной лишь тянущей силой. Соотношение между проталкивающей и тянущей силами при волочении с подпором и с учетом упрочнения металла равно  $m_p = \mu / C$ .

В перспективе предполагается рассмотреть выбор давления подпора с учетом локализации деформаций, предшествующих разрушению; вибропластического эффекта; согласование частот собственных – прутка и подпора.

#### **Выводы.**

1. Соотношение между силами волочения и подпора выбираем в интервале давлений между напряжением текучести прутка после выхода его из волокна и напряжением, обеспечивающим запас устойчивости (отсутствие потери устойчивости). Это соотношение равно 1,05 – 1,50.

2. Волочение изделий из труднодеформируемых материалов целесообразно проводить волочением с подпором используя деформируемую прутки в нагретом состоянии или с использованием вибропластического эффекта.

#### **Библиографический список**

1. Шаповал В.Н., Познанский В.И. *Определение технологических параметров процесса многоступенчатого вибрационного деформиро-*

вания заготовок волочением и проталкиванием через монолитные матрицы. – Вісник КДПУ. - 2006 Вип.5(40). – С. 59 - 63.

2. Шаповал А.Н. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена / А.Н. Шаповал, С.М. Горбатюк, А.А. Шаповал – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2006. – 352 с.

3. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием. – Харьков: изд-во Харьк. гос. унив-та, 1969. – 108 с.

4. Шаповал В.Н., Чиглаков Н.М. Динамические напряжения в очаге деформации при вибрационном заталкивании прутков в волоку. – Изв. высш. уч. завед. Черная металлургия, 1975. - №12. – С. 72 – 75.

5. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металла. – Харьков: изд-во Харьк. гос. унив-та, 1958. – 188 с.

6. Зибель Э. Обработка металлов в пластическом состоянии. – М.: ОНТИ, 1934. – 287 с.

7. Шаповал В.Н., Колчин О.П., Шаповал А.Н. Об оптимальном соотношении между тянущей и проталкивающей силами при волочении с под пором. – Получение и обработка тугоплавких металлов и сплавов. Научн. Труды / ВНИИТС. М.: Металлургия, 1987. – С. 72-76.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Лученко В.А.*