

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ВИБРАЦИОННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ВОЛОЧЕНИЕМ И ПРОТАЛКИВАНИЕМ ЧЕРЕЗ МОНОЛИТНЫЕ МАТРИЦЫ

Шаповал В.Н., Познанский В.И.

Кременчугский государственный политехнический университет

**Введение.** Заготовки для сварочных электродов, катодов плазмотронов, режущего инструмента требуются развивающимся технологиям металлообработки во всё возрастающих количествах. Изготовление упомянутых и ряда подобных изделий из тугоплавких металлов и высоколегированных сталей целесообразно осуществлять способами вибрационного деформирования бесконтейнерным прессованием (проталкиванием) и волочением через монокристаллические матрицы. Для этого весьма перспективным является многоступенчатое деформирование с применением виброколебаний матриц со сдвигом по фазе [1]. Известные технические и технологические решения в данном направлении находятся на стадии освоения и требуют оптимизации схем и режимов процесса деформирования заготовок.

**Цель работы.** Основной целью данной работы является аналитическое исследование вибропроцесса, составление его математической модели, разработка и выбор методов решения задачи, подготовка программы расчета для решения задачи на ПК.

**Материалы и результаты исследований.** Авторами разработана новая технологическая схема многоступенчатого вибрационного деформирования прутков проталкиванием и волочением через монокристаллические матрицы в условиях поочередного их нагружения.

Согласно технологии металл 1 (рис. 1) с помощью проталкивающего 2 и тянущего 3 подающих устройств, выполненных каждое в виде двух бесконечных цепей, пропускается через систему из шести монокристаллических матриц 4-9, которым электромагнитами 10, включенными в разные фазы шестифазной сети переменного тока через управляемые выпрямители 11, сообщаются поочередные колебательные движения вдоль оси.

Для того, чтобы действие тянущей силы не передавалось через металл на первые три матрицы 4-6, в промежутке между матрицами 6 и 7 необходимо постоянно иметь избыток (запас) металла, который формируют в виде петли 12.

Для образования избытка металла в промежутке между матрицами 6 и 7 необходимо, чтобы в течение какого-то времени скорость подачи металла в этот промежуток проталкивающим устройством 2 превышала скорость вытягивания металла из указанного промежутка тянущим устройством 3, т.е.

$$v_0 m_4 m_5 m_6 > v_1 / m_7 m_8 m_9, \quad (9)$$

где  $v_0$ ,  $v_1$  – скорости соответственно проталкивающего 2 и тянущего 3 подающих устройств;  $m_4 - m_9$  – коэффициенты вытяжки металла в соответствующих матрицах.

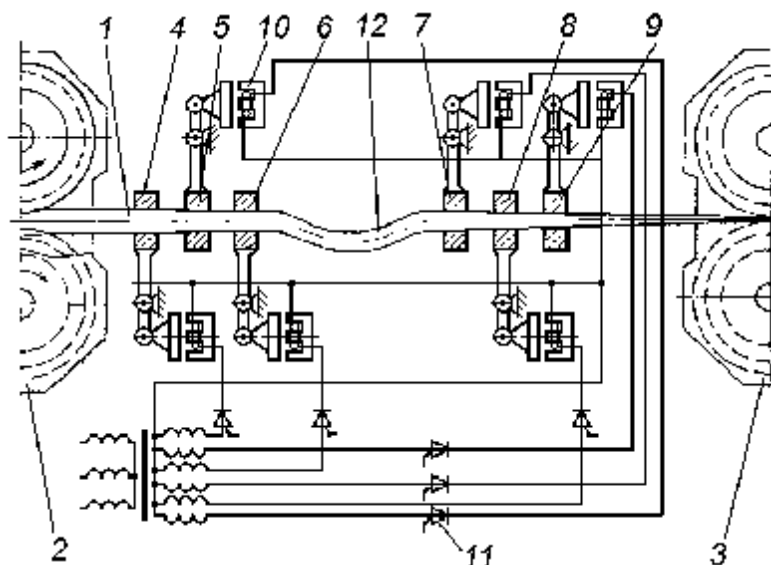


Рисунок 1 - Схема установки для многоступенчатого деформирования прутков

Задав в соответствии с (9) начальное

соотношение между скоростями  $v_0$ ,  $v_1$  подающих

устройств 2, 3, получают предпосылки для образования в промежутке между матрицами 6 и 7 избытка металла в виде петли 12.

После этого накопление металла в промежутке между матрицами 6 и 7 прекращают, для чего соотношение между скоростями приводят в соответствие условию непрерывности:

$$v_0 m_4 m_5 m_6 = v_1 / m_7 m_8 m_9, \quad (10)$$

Весь установившийся процесс деформирования ведут с соблюдением условия (10).

Наличие избытка металла в виде петли в промежутке между матрицами 6, 7 препятствует силовой связи между частями металла, деформируемыми группами матриц, расположенных до петли и после неё. Таким образом, поддержание начального избытка металла в промежутке между матрицами 6 и 7 на протяжении установившегося процесса приводит к тому, что деформирование металла в матрицах 4-6 осуществляется проталкиванием, а в матрицах 7-9 – волочением.

В зависимости от числа матриц, деформирующих металл проталкиванием и волочением, местоположение петли 12 может изменяться.

Как следует из изложенного, при многоступенчатом деформировании величина деформации за проход в несколько раз превышает деформацию в одной матрице. В связи с тем, что деформация может быть не только горячей, но и холодной, а также неполной холодной, необходимо учитывать склонность металла к упрочнению, т.е. необходимо знать допустимую величину суммарной деформации металла без разупрочняющей термообработки  $e_s$ , которую примем в качестве исходной при определении количества  $z$  матриц в системе:

$$z = e_s / e_{cp}, \quad (11)$$

где  $e_{cp}$  – средняя величина деформации в одной матрице, которая задается исходя из пластических свойств обрабатываемого материала, его склонности к упрочнению и др.

Результат вычисления по формуле (11) необходимо округлить до целого числа. Соотношение между количеством матриц, деформирующих металл проталкиванием и волочением, зависит от степени деформации  $e_n$ , полученной металлом ранее, так называемой начальной деформации. Известно, что ряд материалов, получаемых методом спекания из порошков, позволяют обработку волочением лишь после получения определенной начальной деформации. До получения указанной степени деформации такие материалы могут обрабатываться лишь проталкиванием.

Таким образом, если

$$e_d - e_n < e_{cp}, \quad (12)$$

металл обрабатывают проталкиванием. В противном случае возможен комбинированный процесс (проталкивание с последующим волочением) либо волочение.

Количество матриц, деформирующих металл проталкиванием,

$$z_1 = (e_d - e_n) / e_{cp}. \quad (13)$$

Результат вычислений по формуле (13) округляется до целого числа. Полученное таким образом значение  $z_1$  следует сравнить с расчетным числом матриц  $z$ , полученным исходя из допустимой степени деформации без промежуточной термообработки (формула (11)). Если

$$z_1 \geq z, \quad (14)$$

принимаем  $z_1 = z$ ; тогда  $z_2 = 0$ . Это значит, что металл будет подвергаться лишь деформации проталкиванием через матрицы.

При  $z_1 < z$  металл проталкивается через  $z_1$  матриц, а в остальных

$$z_2 = z - z_1 \quad (15)$$

матрицах металл подвергается волочению.

При  $e_d - e_n < e_{cp}$  металл проталкиванием не обрабатывается ( $z_1 = 0$ ). В данном случае  $z_2 = z$ . При  $z \geq 5$  принимаем  $z_2 = 6$ , учитывая специфику построения вибрационного привода матриц.

В работе [4] показано, что процессы проталкивания и волочения могут рассматриваться как частные случаи волочения с подпором. На базе единой методики получены формулы для определения рабочих напряжений волочения и проталкивания в условиях переменной во времени скорости деформирования. Аналитически показано, что динамическая составляющая не должна оказывать влияния на эффективное значение напряжений волочения и проталкивания, которые, таким образом, могут быть определены по идентичным формулам:

$$s = s_s e(1 + f \operatorname{ctg} a), \quad (16)$$

где  $e = \ln m$  – логарифмическая (истинная) деформация;  $s_s$  – напряжение текучести металла в очаге деформации;  $f$  – коэффициент контактного трения;  $a$  – угол конусности матрицы.

Для определения усилий проталкивания или волочения используем формулу, полученную на основании (16)

$$P_i = s_i S_{si} e_i K, \quad (17)$$

где  $s_i$  – площадь приложения рабочего напряжения;  $S_{si}$  – среднее для очага деформации  $i$ -й матрицы значение напряжения текучести металла;  $e_i$  – деформация металла  $i$ -й матрицей;  $K$  – коэффициент, учитывающий непроизводительные затраты деформирующей силы и запас прочности полосы.

Сила волочения или проталкивания через систему из  $z$  матриц

$$P_{1-z} = \sum_{i=1}^z P_{\text{эф}i},$$

а при условии равенства сил отдельных матриц

$$P_{\text{эф}1} = P_{\text{эф}2} = \dots = P_{\text{эф}z} = P_{\text{эф}}$$

$$P_{1-z} = z P_{\text{эф}}.$$

Из условия

$$P_{1-z} \leq P_n$$

следует, что

$$P_{\text{эф}} \leq P_n / z = P_n k_t,$$

где  $k_t$  – коэффициент, характеризующий снижение силы при вибрации. Таким образом,

$$k_t = 1/z. \quad (18)$$

В работе [3] аналитически показано, что вне зависимости от количества используемых в вибропроцессе матриц, величина  $k_t$  определяется по формуле (6).

Режим деформирования металла характеризуется распределением деформации между матрицами. При проталкивании расчет ведем по ходу деформирования исходя из величины деформации в первой матрице

$$e_1 = 0,7 e_{cp}. \quad (19)$$

Соотношение (19) между минимальной и средней величиной деформации получено на основании среднестатистических данных. Степень деформации в  $i$ -й матрице

$$e_i = e_{i-1} m_{i-1} / c_i. \quad (20)$$

Для осуществления вычислений по формуле (20) циклами от  $i=1$  до  $z_1$  принимаем для  $i=0$  следующие начальные значения параметров:

$$e_0 = e_1; m_0 = 1,0; e_{c0} = 0.$$

Для каждой из матриц от  $i=1$  до  $z_1$

$$m_i = \exp(e_i); c_i = \sqrt[4]{m_i}. \quad (21)$$

Текущее значение суммарной деформации

$$e_{ci} = e_{c(i-1)} + e_i. \quad (22)$$

Величина деформации проталкиванием через  $z_1$  матриц

$$e_{01} = e_{cz_1}. \quad (23)$$

Распределение деформации между матрицами при волочении производим против хода волочения. Для последней матрицы системы имеем

$$P_z = s_z S_{sk} / k = s_z S_{sz} e_z K, \quad (24)$$

где  $S_{sk}$  – напряжение текучести металла после выхода из  $z$ -й матрицы;  $K$  – коэффициент запаса прочности полосы.

С незначительной погрешностью можно положить

$$S_{sz} = S_{ik} \quad (25)$$

тогда из (24) получим величину деформации в последней матрице.

$$e_z = 1/K.$$

Для  $i = z + 1$  полагаем

$$e_{z+1} = 1/K; m_{z+1} = 1,0; c_{z+1} = 1,0;$$

$$e_{c(z+1)} = 0. \quad (26)$$

Распределение деформаций между матрицами целесообразно производить из условия равенства сил матриц; тогда

$$\begin{aligned} e_i &= e_{i+1} c_i / m_{i+1}; \\ c_i &= \sqrt[4]{m_i}; \\ m_i &= \exp(e_i). \end{aligned} \quad (27)$$

Текущее значение суммарной деформации волочением

$$e_{ci} = e_{c(i+1)} + e_i. \quad (28)$$

Величина деформации волочением через  $z_2$  матриц

$$e_{12} = e_{cz_2}. \quad (29)$$

Суммарная деформация в  $z$  матрицах

$$e_c = e_{01} + e_{12}. \quad (30)$$

По полученным значениям  $e_i$ ,  $m_i$  и  $e_c$  производится расчет амплитуд колебаний матриц.

Для выполнения такого расчета, кроме указанных параметров, необходимо определить важнейшую характеристику вибропроцесса – скоростной показатель  $b$ , представляющий собой отношение скорости деформирования  $v_0$  к амплитудному значению колебательной скорости инструмента  $v_{k_{\max}} = 2pnA_0$ :

$$b = v_0 / 2pnA_{01}. \quad (31)$$

Исходными параметрами для определения  $b$  являются скорость деформирования  $v_0$  и коэффициент  $k_t$ , характеризующий снижение эффективной силы при вибрации.

В работе [3] установлено, что количество применяемых матриц в системе обуславливает соответствующее значение  $b$  через связанный с ним зависимостью (6) коэффициент  $k_t$ . Последний определяем по формуле (18).

Допущения, принятые при выводе формулы (6), снижают её точность в области значений  $0 < k_t < 0,2$ . Поэтому при  $z = 6$  полученное по (18) значение  $k_t = 0,1666$  следует округлить до  $k_t = 0,2$ .

Уравнение (6), связывающее  $k_t$  и  $b$ , трансцендентно относительно  $b$ . В связи с этим решение его на ЭВМ производим численными методами. Вначале задаем  $b$  значения от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1 и получаем соответствующее значение  $k_t$ .

Используя известное соотношение

$$1 + tg^2 a = 1 / \cos^2 a,$$

полагаем

$$\arccos b = \arctg(\sqrt{1 - b^2} / b) = c. \quad (32)$$

На втором этапе по заданному  $k_t$  определяем соответствующее ему значение  $b$ . Для этого изучаем массив  $k_{ii}$ , сравнивая значения его элементов  $k_{ii}$  с заданным  $k_t$ . Критерием сравнения выбираем разность  $k_{ii} - k_t$ , абсолютная величина которой должна быть не более 0,005. При отсутствии в массиве значения  $k_{ii}$ , удовлетворяющего условию  $|k_{ii} - k_t| \leq 0,005$ , и соответствующего значения  $b$ , определяем  $b$ , решая уравнение (6) методом итерации. Для этого уравнение (6) приводим к виду  $x = f(x)$ , т.е.

$$\arccos b = (1 - k_t)p - \sqrt{1 - b} \frac{\arccos b}{\sin \arccos b}. \quad (33)$$

Из (31) можно определить минимальную величину амплитуды колебаний, т.е. амплитуду колебаний первой по ходу деформирования матрицы

$$A_{01} = v_0 / 2pnb \cdot N \quad (34)$$

Значения амплитуды для остальных матриц рассчитываются по формуле

$$A_{0i} = A_{01} m_{0i} / m_c,$$

где  $m_{0i} = \exp(e_{0i})$ ;  $m_c = \exp(e_c)$ .

Блок-схема и программа математической модели процесса многоступенчатого вибрационного деформирования нашли практическое применение. Соотношения между входными и выходными параметрами расчётов усматриваются из примера расчёта, в котором значения E1, E2, E3, E4, K6, V, N (табл. 1) заданы соответственно 0,18; 2,85; 3,22; 1,24; 3,8; 0,15; 50; при этом для Z=6; Z1=2; Z2=4 получены числовые данные суммарной деформации S1=1,183; деформации проталкиванием S4=0,36; деформации волочением S2=0,82; величины скоростного показателя B=0,03; степени снижения силы R=80% и амплитуды колебаний матриц A(I) соответственно с первой по шестую: 5,67; 6,78; 7,96; 9,57; 11,87; 15,45 мм.

**Таблица 1 –  
Условные обозначения параметров**

Наименование параметра	Условное обозначение	Символ на языке программы.
Средняя величина деформации в матрице	$e_{cp}$	E1
Начальная деформация	$e_n$	E2
Величина начальной деформации, допускающая волочение	$e_0$	E3
Допустимая величина деформации без промежуточной термообработки	$e_3$	E4
Количество матриц в системе	$z$	Z
Количество матриц, деформирующих металл проталкиванием	$z_1$	Z1
Количество матриц, деформирующих металл волочением	$z_2$	Z2
Деформация проталкиванием	$e_{01}$	S1
Деформация волочением	$e_{12}$	S2
Деформация в матрице	$e_i$	E(I)
Коэффициент вытяжки в матрице	$\mu_i$	M(I)
Текущее значение суммарной деформации	$e_{ci}$	S(I)
Конечное значение суммарной деформации	$e_c$	S
Коэффициент упрочнения	$c$	L
Коэффициент запаса	$K$	K4
Коэффициент снижения силы при вибрации	$K_t$	K6
Величина снижения силы	$(\Delta P/P)100$	R
Скорость подачи прутка	$v_0$	V
Амплитуда колебаний матрицы	$A_{0i}$	A(I)
Скоростной показатель вибропроцесса	$B$	B
Частота колебаний матриц	$n$	N

модель адекватно отражает взаимозависимость между основными параметрами процесса вибрационного деформирования металлических заготовок волочением и проталкиванием через монолитные матрицы и имеет практическую ценность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шаповал В.Н., Шаповал Е.В. Разработка процессов многоступенчатого вибрационного волочения и определение требований к вибрационному приводу инструмента. – Вісник КДПУ. 2003. № 3. – с. 79-80.

2. Шаповал В.Н., Шаповал А.Н. Электропривод полупромышленного гусеничного стана для калибровки прутков волочением и проталкиванием. – Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. № 4(15) 2001 с. 72-76.

3. Клименко В.М., Шаповал В.Н. Вибрационная обработка металлов давлением. - Киев: Техника, 1977. - 128 с.

4. Шаповал В.Н., Колчин О.П., Шаповал А.Н. О волочении молибденовых прутков с подпором. - Цветные металлы, 1978, № 11, с. 86-88.

**Вывод.** Предложенная в работе математическая

Статья поступила 17.07.06 г.  
Рекомендовано к печати д.т.н., проф.  
Юрко А.А.