Энгельсский технологический институт (филиал) федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени
Гагарина Ю.А.»

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к выполнению практических работ
по дисциплине «Технология размерной обработки
электрофизическими электрохимическими методами»
для студентов направления

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»

очной и заочной форм обучения

Энгельс 2024

Общие сведения

Размерная ультразвуковая обработка (УРО) осуществляется за счёт движения зёрен абразивной суспензии в пространстве между инструментом и обрабатываемой поверхностью[1,2]. Абразивные зёрна получают энергию от инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой. При ультразвуковой обработке главное движение (движение резания) - продольные колебания инструмента, а вспомогательное движение - движение подачи инструмента.

Процесс УРО зависит от следующих технологических параметров: свойств обрабатываемого материала; твёрдости и размеров абразивных зёрен; концентрации абразивной суспензии; частоты и амплитуды колебаний инструмента; статической нагрузки на инструмент и т.д.

По частоте ультразвуковые колебания распространяются от $16 \cdot 10^3$ и 10^8 Гц.

Для питания ультразвуковых преобразователей используют машинные и полупроводниковые (широкодиапазонные) генераторы.

В качестве абразива используют порошки карбида бора, карбида кремния, электрокорунда, а для приготовления абразивной суспензии применяют воду.

Ультразвуковое поле характеризуется частотой f и амплитудой ξ колебаний. Максимальное звуковое давление определяем из выражения

$$P_m = \rho c \omega \xi \text{ [Па]}, \tag{1}$$

где ρ - плотность среды;

c - скорость распространения звука в среде;

ω - угловая частота ($\omega = 2\pi f$).

Интенсивность ультразвуковых колебаний, или силу звука, находим по формуле

$$J = \frac{P_m^2}{2\rho c} \text{ [Вт/м}^2\text{]}. \tag{2}$$

Оптимальная амплитуда колебаний инструмента ξ_u связана средним размером абразивного зерна зависимостью

$$2\xi_u / d_a = 1, \tag{3}$$

где d_a - условный диаметр абразивного зерна, мкм.

При очень малых размерах зерна и больших амплитудах колебаний происходит не внедрение зёрен в обрабатываемую поверхность, а их дробление. При очень малых амплитудах колебаний и крупных абразивных зёрнах импульс удара недостаточен для внедрения зерна в обрабатываемый материал для его разрушения.

При ультразвуковой обработке инструмент прижимается к поверхности заготовки с постоянной силой $P_{ст}$ (сила подачи). Оптимальная сила подачи подбирается экспериментально и составляет $P_{ст} = 20...200$ Н. Давление прижима

$$P_{пр} = P_{ст} / S \,, \tag{4}$$

где S - площадь торца инструмента.

Производительность УРО характеризуется скоростью съёма материала заготовки при определённом поперечном сечении инструмента. Она рассчитывается по формуле

$$Q = \Psi \left(\xi_u^2 P_{ст} \right)^a f^b \,, \tag{5}$$

где Ψ - коэффициент зависящий от свойств обрабатываемого материала и абразивной суспензии; $a = 0{,}5...1$ и $b = 0{,}5...1$-показатели степени, зависимые от условий обработки;

ξ_n - амплитуда колебаний инструмента, мкм;

$P_{ст}$ - сила подачи, Н;

f - частота, Гц.

Оптимальные условия УРО обеспечиваются при массовом соотношении абразива и воды 1:1…1:2, что обеспечивает циркуляцию абразивной суспензии, (циркуляция суспензии осуществляется принудительной прокачкой или периодическим подъёмом и опусканием инструмента). Скорость УРО находим из выражения

$$V = \frac{Q}{S} \,. \tag{6}$$

Основное время обработки определяем по формуле

$$t_0 = \frac{z}{V} \,, \tag{7}$$

где z - припуск.

Прокачку суспензии и удаление продуктов обработки осуществляют: через зазоры между инструментом и заготовкой, через специальные отверстия в инструменте (заготовке), а также периодическим подъёмом и опусканием инструмента (заготовки). В последнем случае время подъёма и опускания должно учитываться фактическим временем обработки

$$t_{0.ср} = t_0 + t_{хх} \,, \tag{8}$$

где $t_{хх}$ - время холостых ходов инструмента для обеспечения циркуляции суспензии.

Фактическую производительность УРО в данном случае определим из выражения

$$Q_{ср} = \frac{V_м}{t_{0.ср}} \,, \tag{9}$$

где $V_м$ - объём удаляемого припуска на обработку.

Для обеспечения высоких технологических показателей УРО необходимо правильно рассчитать и выбрать ультразвуковую колебательную систему, в которую входят: электроакустический преобразователь, концентратор или преобразователь упругих колебаний и рабочий инструмент (рис. 1).

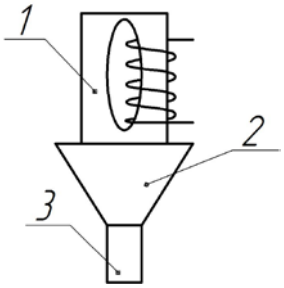

Рис. 1 -Ультразвуковая колебательная система: 1 - преобразователь; 2 - концентратор; 3 - инструмент

Ультразвуковой магнитострикционный преобразователь представляет собой сердечник из магнитострикционного материала с обмоткой, питаемой от ультразвукового генератора (рис. 2).

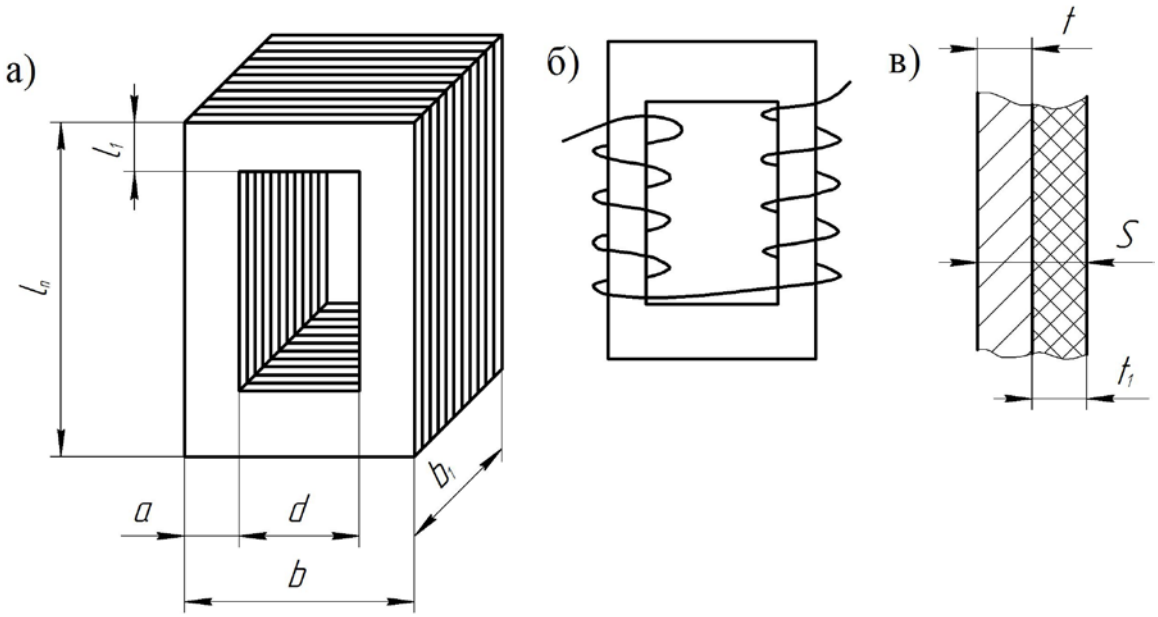

Рис. 2- Схема магнитострикционного преобразователя

Магнитострикционная деформация характеризуется отношением

$$\frac{\Delta l}{l} = 10^{-6} ... 10^{-5}, \qquad (10)$$

где Δl - деформация на длине l.

Амплитуда колебаний $\xi = 5...10$ мкм.

Хорошими магнитострикционными свойствами обладает сплав платины с железом. Наиболее широкое применение нашли сплавы: железокобальтовый (пермендюр) и железоалюминиевый (альфер).

Для уменьшения вихревых токов (токов Фуко), магнитного гистерезиса и связанных с ними потерь сердечники набирают из пластин

толщиной 0,1...0,2 мм, изолированных друг от друга (t - толщина пластины, t_1 - толщина изолятора, s - шаг (рис. 2, а,в).

Обмотка преобразователя (рис. 2,б) должна обеспечивать в зависимости от нагрузки I до 10 А; U до 100 В. Витки обмотки не должны касаться пакета.

Порядок проектирования преобразователей предусматривает следующие этапы:

- выбирают частоту колебаний, f и параметры обмотки, в зависимости от функционального назначения и мощности задаются конструктивным размером a, рис. 5.7, а;

- подбирают магнитострикционный материал (пермендюр - $C = 5170$ м/с; $\xi = 8$ мкм; альфер - $C = 5200$ м/с; $\xi = 6$ мкм; где C - скорость распространения звука в материале; ξ - амплитуда колебаний);

- определяют длину волны ультразвуковых колебаний, из выражения

$$\lambda = \frac{c}{f}; \tag{11}$$

- определяют конструктивные размеры сердечника, рис. 2,а

$$I_n = \frac{\lambda}{2}; \tag{12}$$

$$l_1 = (1{,}0...1{,}1)a; \tag{13}$$

$$d = 1{,}3a; \tag{14}$$

$$b = 2a + d; \tag{15}$$

$$b_1 = (1...0{,}5)b; \tag{16}$$

$$n = \frac{b_1}{s}, \tag{17}$$

где $s = t + t_1$ - шаг.

Параметры ультразвуковых инструментов и концентраторов (рис.3) устанавливаются в зависимости от амплитуды колебаний, которая определяется технологическими требованиями, свойствами обрабатываемого материала и размерами абразивных зёрен.

Если амплитуда преобразователя ξ_n а по технологическим условиям амплитуда инструмента должна быть ξ_u, то между преобразователем и инструментом устанавливают концентратор с определённым коэффициентом трансформации, определяемым по формуле

$$M = \frac{\xi_u}{\xi_n} = \frac{D_{k.max}}{d_u} = \frac{s_{k.max}}{s_u}. \tag{18}$$

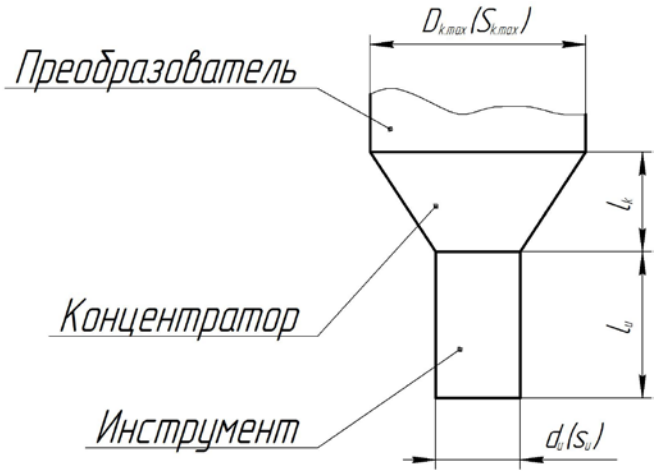

Рис. 5.9-Схема для определения параметров концентратора и инструмента

Длину концентратора (рис. 3) определяем по формуле

$$l_k = \frac{\lambda}{2}. \tag{19}$$

Длину инструмента определяем по формуле

$$l_u = \frac{\lambda}{2} + Z + (10...15) \text{ [мм]}, \tag{20}$$

где Z - припуск на обработку (глубина обработки).

Определение основных технологических показателей УРО и конструктивных параметров ультразвуковой колебательной системы

Задача. Определить производительность, основное время УРО при прошивании квадратного отверстия 10×10 в стеклянной плите толщиной 40 мм и произвести расчёт основных конструктивных параметров ультразвуковой колебательной системы при следующих условиях:

- частота ультразвукового генератора $f = 30$ кГц;

-магнитострикционный материал ультразвукового преобразователя - альфер ($\xi = 6$ мкм , $c = 5200$ м/с);

- шлифпорошок карбид бора с условным диаметром зерна $d_a = 50$ мкм;

- статическая нагрузка на инструмент $P_{ст} = 150$ Н;

- циркуляция абразивной суспензии осуществляется периодическим подъёмом и опусканием инструмента (по режиму, приведённому в таблице 1), со скоростью холостого хода $V_{хх} = 10$ мм/с, причём перебег инструмента в верхнем положении $l_п = 2$ мм, а выстой $t_в = 1$ с.

Таблица 1-Режим перемещения инструмента

Глубина обработки, мм (от – до)	0-10	10-20	20-30	30-40
Количество циклов вывода-ввода инструмента	1	2	3	4

Решение:

Определяем оптимальную амплитуду колебаний инструмента из выражения 3:

$$\xi_u = \frac{d_a}{2} = \frac{50}{2} = 25\,\text{мкм}.$$

В качестве несущей жидкости используем воду. Примем массовое отношение карбида бора к воде 1:1,5.

Определяем теоретическую производительность УРО по формуле 5.35, принимая

$a = b = 1$ и $\Psi = 2 \cdot 10^{-5}$

$Q = \Psi\left(\xi_u^2 P_{cm}\right)^a f^b = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \left[\left(25 \cdot 10^{-6}\right)^2 \cdot 150\right]^1 \cdot \left(30 \cdot 10^3\right)^1 = 5628 \cdot 10^{-11}$ м^3/с $= 3376\,\text{мм}^3$/мин.

Определяем скорость обработки по формуле 5.36.

$V = \frac{Q}{S} = \frac{3376}{100} = 33{,}76$ мм/мин, где $s = 10 \cdot 10 = 100\,\text{мм}^2$.

Определяем время обработки по формуле 7:

$t_0 = \frac{Z}{V} = \frac{40}{33{,}76} = 1{,}18$ мин (без учёта времени на подъём и опускание инструмента).

Определяем путь и время холостых ходов, пройденных инструментом для обеспечения циркуляции абразивной суспензии.

Согласно таблице 1, на глубине обработки 10 мм произойдёт один цикл подъёма и опускания инструмента с временем выстоя в верхнем положении 1 с и с перебегом инструмента 2 мм. На глубине обработки от 10 до 20 мм необходимо обеспечить два цикла подъёма и опускания инструмента (с глубины 15 и 20 мм) и так далее. Для каждого цикла подъёма и опускания инструмента длину холостого хода определяем из выражения

$$l_{xx_i} = \left(l_i + 2\right) \cdot 2\,.$$

После прошивания отверстия глубиной 40 мм инструмент должен сделать перебег на 2 мм, а затем подняться в исходную точку, означающую окончание обработки. Длину холостого хода в данном случае определим как $l_{xx_{40}} = 40 + 2 + 2 = 44$ мм.

Результаты расчёта холостых ходов инструмента сведены в таблицу 2.

Таблица 2-Результаты расчета холостых ходов инструмента

Порядковый номер цикла холостого хода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Глубина отверстия, с которого осуществляется цикл, l_i, мм	10	15	20	23,3	26,6	30	32,5	35	37,5	40
Длина холостого хода (путь) пройденного инструментом за цикл, l_{xx}, мм	24	34	44	50,6	57,2	64	69	74	79	44

$$\sum l_{xx} = 539{,}8.$$

Время, затраченное на выполнение холостых ходов, определим из выражения

$$t_{xx} = \frac{\sum l_{xx}}{V_{xx}} + 9t_в = \frac{539{,}8}{10} + 9 \cdot 1 = 62{,}98 \text{ с} = 1{,}05 \text{ мин.}$$

Определяем фактическое время, затраченное на обработку отверстия (формула 5.37):

Отсюда фактическая производительность (формула 9):

$$Q_{ср} = \frac{V_м}{t_{0.ср}} = \frac{4000}{2{,}23} = 1793{,}72 \text{ мм}^3\text{/мин; где } V_м = 40 \cdot 10 \cdot 10 = 4000 \text{ мм}^3.$$

Для расчёта конструктивных параметров ультразвуковой колебательной системы примем $a = 10$ мм; $t = 0{,}2$ мм; $t_1 = 0{,}1$ мм.

Определяем длину волны ультразвуковых колебаний по формуле 5.41:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{5200}{30000} = 0{,}173 \text{ м} = 173 \text{ мм.}$$

Определяем конструктивные размеры сердечника-преобразователя (по формулам 5.42 ... 5.47) (рис. 5.7):

$$I_п = \frac{\lambda}{2} = \frac{173}{2} = 86{,}5 \text{ мм; } l_1 = a = 10 \text{ мм;}$$

$$d = 1{,}3a = 13 \text{ мм; } b = 2a + d = 2 \cdot 10 + 13 = 33 \text{ мм;}$$

$$b_1 = b = 33 \text{ мм; } s = t + t_1 = 0{,}2 + 0{,}1 = 0{,}3 \text{ мм;}$$

$$n = \frac{b_1}{s} = \frac{33}{0{,}3} = 110 \text{ шт.}$$

Определяем коэффициент трансформации между преобразователем и инструментом (формула 18):

$$M = \frac{\xi_u}{\xi_n} = \frac{25}{6} = 4{,}16.$$

Определяем размер концентратора и инструмента (рис 2). Площадь рабочей поверхности инструмента составляет

$$S_u = 10 \cdot 10 = 100 \text{ мм}^2.$$

Максимальная площадь концентратора

$$S_{k.max} = S_u M = 100 \cdot 4{,}16 = 416 \text{ мм}^2.$$

Представим эту площадь в виде квадрата со стороной 20,4 мм.

Минимальная площадь концентратора равна площади рабочей поверхности инструмента, $S_{k.min} = 10 \cdot 10 = 100$ мм^2. Концентратор представляет собой усечённую пирамиду высотой $l_k = \frac{\lambda}{2} = \frac{173}{2} = 86{,}5$ мм (длина концентратора).

Инструмент представляет собой квадратный стержень (10×10), длину которого определяем по формуле 20:

$$l_u = \frac{\lambda}{2} + Z + (10...15) = \frac{173}{2} + 40 + 13{,}5 = 140 \text{ мм}.$$

Общая длина колебательной системы будет

$$l_n + l_k + l_u = 86{,}5 + 86{,}5 + 140 = 313 \text{ мм}.$$

Проектирование ультразвуковых колебательных систем

Используя методику, изложенную в разделах 3.1, 3,2, и данные таблицы 2, определить основные размеры и выполнить эскизы ультразвуковых колебательных систем для прошивания отверстий в твердосплавных пластинах.

Таблица 3-Основные размеры ультразвуковых колебательных систем

№ варианта	Толщина пластины, мм	Диаметр обрабатываемого отверстия d_u, мм	Условный размер абразивного зерна d_a, мкм	Частота колебаний генератора f, кГц	Конструктивный размер a, мм	Магнитострикционный материал
1	5	2	36	40	5	Пермедюр $c = 5177$ м/с $\xi = 8$ мкм
2	10	4	40	30		
3	8	6	20	25	8	
4	12	3	26	32		
5	15	10	48	36	10	
6	6	8	30	45		Альфер

7	12	12	56	30	12	$c = 5200$ м/с $\xi = 6$ мкм
8	20	5	44	42		
9	17	12	52	55	15	
10	25	7	36	48		

Список литературы

1. Артамонов Б.А. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов[Текст]: учебное пособие В 2 т. М.: Высшая школа, 1983.-326с.

2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки[Текст]: / Под ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение, 1988.-719с.