

УДК 621.9.048

Ю.М.Ревенко

**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ  
СОВМЕЩЕННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И  
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ**

**Введение.** Данная работа посвящена оптимизации режимов совмещенной ультразвуковой (УЗ) и электрохимической (ЭХ) обработки твердых сплавов для повышения ее производительности.

**Цель статьи** – на основе ранее выведенной автором зависимости производительности совмещенной УЗ и ЭХ обработки твердых сплавов от ее параметров [1,2,3] разработать расчетный метод определения оптимальных технологических режимов совмещенной обработки твердых сплавов при заданной точности обработки и шероховатости обработанной поверхности.

Использование этих режимов, соответствующих максимальной производительности обработки в условиях острого дефицита твердых сплавов, а особенно вольфрамсодержащих, широко применяемых для изготовления технологической оснастки (фильер, матриц и пуансонов штампов и др.), и большой трудоемкости их размерной обработки, является весьма актуальной проблемой.

**Основное содержание.** К числу основных путей повышения эффективности совмещенной обработки твердых сплавов следует отнести оптимизацию ее режимов. Так как при совмещенной УЗ и ЭХ обработке твердых сплавов анодное растворение не изменяет основных закономерностей УЗ обработки [ 4 ], то для рассмотрения вопросов оптимизации ее режимов целесообразно проанализировать существующие способы выбора оптимальных режимов и при УЗ обработке.

Учеными СССР разработан ряд методов по определению оптимальных режимов УЗ обработки твердых и хрупких материалов. В их числе экспериментальный, графический и расчетный методы.

На практике выбор режимов размерной УЗ обработки производился в следующей последовательности [5]:

- выбирается зернистость абразива, в соответствии с заданной точностью и шероховатостью обрабатываемой поверхности;

- выбираются размеры концентратора с коэффициентом усиления, обеспечивающим получение максимально допустимой амплитуды холостого хода;

- определяется экспериментально оптимальное усилие подачи. Для чего проводится ряд опытов с различными усилиями подачи при постоянных значениях амплитуды, зернистости абразива и давления в системе подачи абразивной суспензии. Строится график зависимости производительности от усилия подачи и определяется искомое усилие подачи.

Экспериментальный метод определения оптимальных режимов УЗ обработки обладает следующими недостатками [6,7]:

- во-первых, при выборе коэффициента усиления концентратора по максимальной амплитуде холостого хода не учитываются реальные условия обработки (влияние на него нагрузки, усилия подачи, зернистости абразива);

- во-вторых, для экспериментального определения усилия подачи необходимо проводить опыты не с одним, а с рядом концентраторов, имеющими различные коэффициенты усиления и рабочие амплитуды колебаний, т.к. оптимальный коэффициент усиления фактически не был установлен.

Следовательно, экспериментальный метод не обеспечивает определения оптимального коэффициента усиления концентратора и оптимального усилия подачи инструмента. Если же эксперименты проводить для целого ряда концентраторов с различными коэффициентами усиления, усилиями подач и рабочими амплитудами, то это для условий производства является очень трудоемким процессом и практически неосуществимым. Поэтому, как правило, выбранные режимы не являются оптимальными и не соответствуют максимальной производительности, т.е. энергоемкое оборудование используется частично, что значительно повышает себестоимость обработки [5].

С целью уменьшения трудоемкости выбора оптимальных режимов УЗ обработки в ЭНИМСе была разработана методика [8,9] по выбору усилия подачи по эмпирическим диаграммам, с учетом площади обработки и давления абразивной суспензии (рис. 1).

Однако данная методика также не обеспечивает получение оптимального значения усилия подачи инструмента, т.к. не

учитывает влияния на него зернистости абразива и амплитуды колебания инструмента. Кроме того, графическая зависимость, полученная в ЭНИМСе (рис. 1) для определения оптимального усилия не учитывает большого разброса по характеристикам колебательных систем ультразвуковых станков [7].

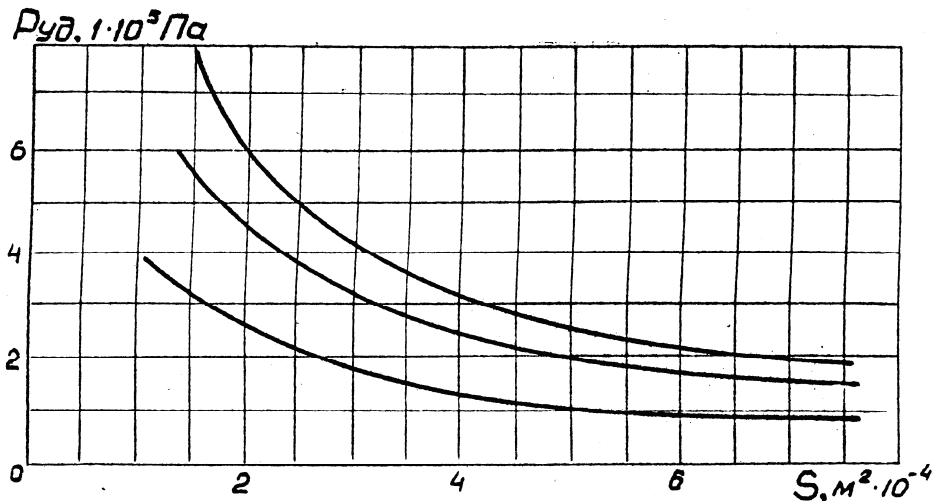


Рисунок 1 - Зависимость удельной силы прижима  $P_{уд}$  от площади обработки  $S$  и давления абразивной суспензии [10]

Учитывая недостатки описанных методов, Поляковым З.И. и Вшивцовым А.З., была получена теоретическая зависимость производительности УЗ обработки от её технологических параметров, которая была положена ими в основу расчетного метода определения оптимальных режимов [7, 11].

При совмещенной УЗ и ЗХ обработке твердых сплавов её оптимальные режимы (рабочая амплитуда, усилие подачи и коэффициент усиления концентратора) не совпадают по абсолютной величине с режимами, присущими чисто УЗ обработке. Это связано с тем, что оптимальные режимы УЗ обработки без совмещения с ЭХ не являются оптимальными для совмещенной обработки, т.к., при их выборе или расчете не учитывается анодное растворение твердого сплава, т.е. уменьшение прочности и повышение хрупкости обрабатываемой поверхности за счет анодного растворения кобальтовой связки.

Основываясь на положительные результаты, достигнутые в области расчета оптимальных режимов УЗ обработки, для случая совмещенной обработки использовалась выведенная функциональная зависимость производительности от режимов совмещенной обработки

твердых сплавов [ 2 ]. После постановки в нее найденных значений  $K_A$ ,  $K_i$  и  $K_\xi$  получим её окончательный вид (1). Так как размерность амплитуды колебания в данной зависимости в м  $\cdot 10^{-2}$ , то коэффициент  $K_A$  будет определяться следующим выражением:

$$K_A = 1 + 0,6 \cdot (1 - 10^{-239A}).$$

$$M_{COBM} = \theta \cdot C \cdot i \cdot F [1 + 0,6(1 - 10^{-239A})] \cdot [3 - 0,2(\xi - 10)^2] + 0,25 \cdot K_1^3 \cdot K_\phi \cdot N \cdot \rho^{1,5} \cdot f \cdot \eta^{-3} \cdot \sigma^{-1} \cdot K_I - \gamma_{\max}^{5,608} \cdot (K_{III} \cdot \gamma_{\max}^{0,84} - \delta_{нач.}) \cdot EXP[-(\bar{\xi} - \xi_{\max})^2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma^{-2}] \cdot [1 + 5(1 - 10^{-0,0159i})] \quad (1)$$

Так как совмещенная обработка используется преимущественно в качестве черновой операции, то оптимальными режимами будут такие, которые соответствуют максимальной производительности при заданных точностях обработки и шероховатости обработанной поверхности.

При оптимизации совмещенной обработки использовались следующие параметры системы:

1. Площадь обработки  $F$ ;
2. Величины шероховатости обработанной поверхности и точности обработки;
3. Предельная возмущающая сила станка  $P_{пред.}$  ;
4. Параметры механической колебательной системы  $l_n, l_k, l_H$  - длины магнестрикционного преобразователя, промежуточного концентратора, расчетная резонансная длина концентратора-инструмента;

$\beta_n, \beta_k, \beta_H$  - постоянные затухания преобразователя, промежуточного концентратора и концентратора-инструмента;

$W_{1.....5}$  - акустические сопротивления элементов трехполуволновой колебательной системы станка, представленной на рис. 2.

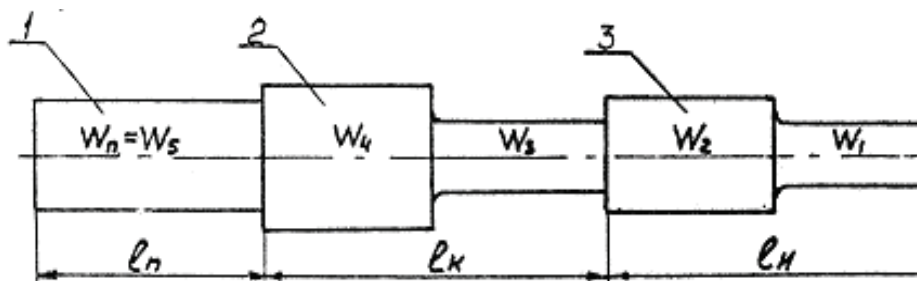


Рисунок 2 - Трехполуволновая колебательная система станка мод. 4Б772: 1 - магнестрикционный преобразователь; 2 - промежуточный концентратор; 3 - концентратор-инструмент

5. Физико-механические свойства обрабатываемого твердого сплава, абразива и инструмента.

Значение  $P_{пред.}$  обычно приведено в паспорте станка или определяется экспериментально. Для станка 4Б772 эта величина находится в диапазоне  $(3 \div 4) \cdot 10^3$  Н [8,10]. В данном случае станок имел  $P_{пред.} = 3,4 \cdot 10^3$  Н.

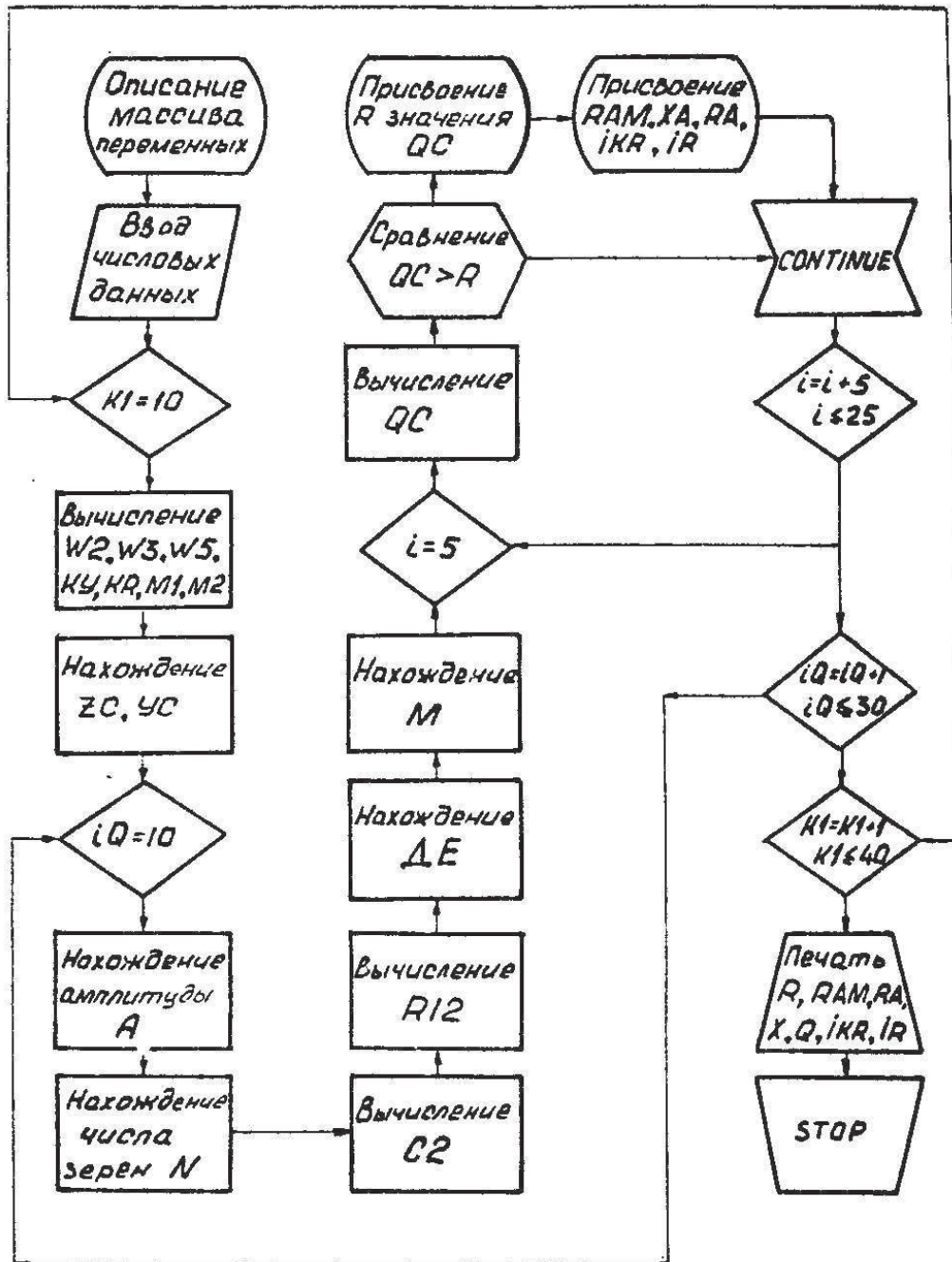


Рисунок 3 - Блок-схема алгоритма расчета режимов совмещенной обработки

При составлении программы расчета на ЭВМ оптимальных режимов в нее были введены характеристики механической колебательной системы станка  $Z_C$  и  $Y_C$ , связанные с амплитудой холостого хода  $A_{XX}$ , усилием подачи  $Q$  и рабочей амплитудой выражением [ 5 ].

$$A = Z_C \cdot A_{XX} - Y_C \cdot Q$$

и определяемые зависимостями [94]:

$$Y_C = \frac{[0,003F + 3 \cdot 10^{-4} (F)^{\frac{1}{3}}] \cdot K_R \cdot K_5 \cdot 10^{-4}}{(K_3 \cdot \beta_n \cdot l_n + K_4 \cdot \beta_n \cdot l_n + 10^{-4} \cdot K_R \cdot K_5) \cdot F} \quad (2)$$

$$Z_C = \frac{K_3 \cdot \beta_n \cdot l_n + K_4 \cdot \beta_n \cdot l_n}{K_3 \cdot \beta_n \cdot l_n + K_4 \cdot \beta_n \cdot l_n + 10^{-4} \cdot K_R \cdot K_5} \quad (3)$$

где  $K = \frac{W_2}{W_1}$  - коэффициент усиления концентратор-инструмента;

$K_\kappa = \frac{W_4}{W_3}$  - коэффициент усиления промежуточного концентратора;

$$K_3 = (W_3 + W_4) \cdot K^{-1} + K_\kappa (W_1 + W_2); \quad (4)$$

$$K_4 = W_5 (K \cdot K_\kappa)^{-1}; \quad (5)$$

$$K_5 = W_5 = W_1 \cdot K \cdot K_\kappa; \quad (6)$$

$$K_R = (1.704 \cdot 10^{-6} \cdot \eta^{-1})^{0.24} \quad (7)$$

$\eta$  - упругая постоянная материалов детали, абразива и инструмента. Величина определялась по формуле [12] :

$$\eta^{2/3} = \eta_1^{2/3} + \eta_2^{2/3} \quad (8)$$

$$\eta_1 = E_1^{-1} (1 - \mu_1^2) + E_2^{-1} (1 - \mu_2^2) \quad (9)$$

где  $\eta_1$  - соответствует материалам инструмента (индекс 1);

$\eta_2$  - соответствует материалам абразива (индекс 2) и детали (индекс 3).

где  $E$  - модуль упругости I рода (модуль Юнга);

$\mu$  - коэффициент Пуассона.

В программу вычисления на ЭВМ оптимальных режимов совмещенной обработки вносим также зависимости, связывающие параметры распределения размеров зерен  $\bar{\xi}_{исх}$ ,  $^*\xi_{исх}$ ,  $\bar{\xi}_{\max исх}$ ,  $\sigma_{исх}$  и значения рабочей амплитуды  $A$  и усилия подачи  $Q$ , установленные в работе А.В.Вшивцова [5] :

$$\bar{\xi} = \bar{\xi}_{исх} - \epsilon_1 \cdot Q \cdot A \quad (10)$$

$$^*\xi = ^*\xi_{исх} - \epsilon_2 \cdot Q \cdot A; \quad (11)$$

$$\xi_{\max} = \xi_{\max исх} - \epsilon_3 \cdot Q \cdot A \quad (12)$$



$$\sigma = 3 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma_{исх} \left[ \frac{\epsilon_4 \cdot Q \cdot 88,65 - \epsilon_5 \cdot Q^2}{\epsilon_6 \cdot A^2 \cdot \epsilon_7 \cdot A - 2,5 \cdot 10^{-4}} \right] \quad (13)$$

Так как не все обозначения величин, входящих в формулу (1) совпадают с приведенными в блок-схеме и программе ниже дается таблица их соответствия (таблица 1).

Таблица 1

Соответствие обозначений величин, приведенных в программе и блок-схеме

Обозначение в программе	Обозначения в формуле	Обозначения в программе	Обозначения в формуле
X	K1/10	K1P	K <sub>1</sub>
C1	$\sigma_{исх}$	K1R	K <sub>1</sub>
C2	$\sigma$	K2R	K <sub>II</sub>
QC	M <sub>СОВМ</sub>	KF	K <sub>Ф</sub>
R	maxM <sub>СОВМ</sub>	B1	B <sub>1</sub>
RA	A <sub>ОПТ</sub>	B2	B <sub>2</sub>
AXX	A <sub>АХХ</sub>	B3	B <sub>3</sub>
ИКР	N <sub>ОПТИМАЛЬНОЙ ЗЕРНИСТОСТИ</sub>	B4 B5	B <sub>4</sub> B <sub>5</sub>
IR	i	B6	B <sub>6</sub>
R1 (ИК)	$\xi$	B7	B <sub>7</sub>
R2 (ИК)	$\bar{\xi}$	B27	$\beta_n$
R3 (ИК)	$\xi_{исх}^*$	EF	f
R4 (ИК)	$\xi_{МАХ.ИСХ}$	F	F <sub>И</sub>
R5 (ИК)	$\xi_{МАХ.}$	M1	$K_3 \cdot \beta_n \cdot l_n +$
R6 (ИК)	$\xi^*$		$K_4 \cdot \beta_n \cdot l_n$
R7 (ИК)	$(\bar{\xi} - \xi_{МАХ.})^2 / \sigma^2$	M2	$K_3 \cdot \beta_n \cdot l +$
R8 (ИК)	$\rho$		$K_4 \cdot \beta_n \cdot l_n +$
R12	$\gamma$		$10^{-4} \cdot K_5 \cdot K_R$
K2	K <sub>2</sub>	DE	$\delta_{НАЧ}$
KK	K <sub>К</sub>	ZC	M1/M2=Z <sub>C</sub>
KAR	X	K11R	K <sub>III</sub>
KO	K <sub>Об.</sub>	УС	У <sub>С</sub>
B11	$\beta_n$	IQ	Q
H	$\eta$	L1	$l_n = l_R$
L	$l_n$		

В качестве примера расчета оптимальных режимов с помощью выведенной нами зависимости (1) рассмотрим обработку совмещенным ультразвуковым и электрохимическим способом отверстия  $\varnothing 31,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  ( $F = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ) в пластине из твердого

сплава марки ВК15 на станке мод. 4Б772 с предельной возмущающей силой  $P_{\text{пред.}} = 3,4 \cdot 10^3$  Н. Заданные шероховатость обработанной поверхности  $R_z = 20$  мкм, точность  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  м.

Исходя из условий заданной шероховатости обработанной поверхности и точности обработки была выбрана шероховатость абразива №10 (абразив-карбид бора). В качестве абразивонесущего электролита использовали рекомендуемый ЭНИМСом [8] состав, в вес, %:  $\text{NaNO}_3 - 15$ ,  $\text{NaNO}_2 - 1$ , абразив - 19, вода -65. Давление абразивной суспензии выбрали равным  $Q_{\text{уд}} = 2 \cdot 10^5$  Па.

Так как площадь обработки более (0,00025 - 0,00090) м<sup>2</sup> по рекомендациям [10] был выбран ступенчатый концентратор-инструмент с центральным отверстием для прокачки абразивонесущего электролита  $\varnothing 9 \cdot 10^{-3}$  м. Материал концентратора-инструмента - сталь 40Х (термообработка-улучшение, НРС 34÷40).

Определяем экспериментально резонансную частоту холостого хода колебательной системы станка с помощью пробного концентратора.

Максимальную амплитуду холостого хода выбирали из условия усталостной прочности концентратора-инструмента,  $A_{\text{ХХ}} = 50$  мкм. Перед обработкой детали  $A_{\text{ХХ}}$  устанавливали варьируя мощностью УЗ генератора станка.

Для нахождения наибольшего значения величины  $M_{\text{совм}}$  согласно блок-схемы (рис. 3) образовались 3 цикла. Первый по К1 изменялся от 10 до 40 с шагом 1. Второй цикл образовывался по 100 Н до 300 Н с шагом 10 Н (верхний предел усилия подачи взят по паспортным данным станка мод. 4Б772). Третий цикл организовывался по  $i$ , при изменении плотности тока  $(5\div 25) \cdot 10^4$  А/м<sup>2</sup> с шагом 5-10 (использование значений плотности тока выше верхней границы значительно снижает точность совмещенной обработки и увеличивает трудоемкость последующей чистовой обработки отверстия (т.е. УЗ обработки)).

С помощью оператора сравнения значения вычисленных  $M_{\text{совм}}$  сравнивались с предыдущим значением и запоминалось большее. И, таким образом, из всех значений  $M_{\text{совм}}$  выбиралось наибольшее. В печать выводились значения максимальной производительности совмещенной УЗ и ЭХ обработки твердого сплава, а также соответствующие ей оптимальные режимы обработки  $A_{\text{раб.}}$ ,  $K_{\text{опт.}}$ ,  $Q_{\text{опт.}}$ ,



$i_{\text{опт}}$ . Ниже приводим список значений, констант и рассчитываемых величин, вводимых в программу:

$$\begin{aligned} B1 &= 0,0145; & B2 &= 0,023; & B3 &= 0,0185; & B4 &= 1,02; \\ B5 &= 0,0127; & B6 &= -0,28; & B7 &= 0,0081; & & \text{(табл.2)}. \end{aligned}$$

Таблица 2 [5]

Значение констант, вводимых в программу, в зависимости от удельного давления абразивной суспензии

Зернистость № 10							
$P,$ $Па \cdot 10^5$	$B_1,$ $(9,8H)^{-1}$	$B_2,$ $(9,8H)^{-1}$	$B_3,$ $(9,8H)^{-1}$	$B_4,$ $(9,8H)^{-1}$	$B_5,$ $(9,8H)^{-1}$	$B_6,$ $(9,8H)^{-1}$	$B_7,$ $(9,8H)^{-1}$
1	0,02090	0,0460	0,0370	1,000	0,0200	1,0000	0,0220
1,5	0,0220	0,0350	0,0280	0,0650	0,0090	0,2300	0,0180
2,0	0,0145	0,0230	0,0185	0,0200	0,0127	-0,2900	0,0081
3,0	0,0062	0,0099	0,0079	0,4360	0,0023	-0,3420	0,0077

Значение параметров распределения размера зерен абразива в неработавшем порошке даны в таблице 3.

Таблица 3 [5]

Параметры распределения размеров абразивных зерен в неработавшем порошке

Номера зернистости	$\bar{\xi}_{\text{исх}} \cdot 10^{-6},$ м	$\xi_{\text{исх}} \cdot 10^{-6},$ м	$\xi_{\text{макс/исх}} \cdot 10^{-6},$ м	$\sigma_{\text{исх}} \cdot 10^{-6},$ м
3	28	26	50	6,7
10	99	76	160	23

$$R2(ИК) = \bar{\xi}_{\text{исх}} = 99 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$R3(ИК) = \xi = 76 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$R4(ИК) = \xi_{\text{максисх}} = 106 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$F = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$КАР = \chi = 0,25 \text{ (объемная концентрация абразива в воде).}$$

Вероятные радиусы округления абразивных зерен карбида бора и коэффициенты заполнения для его порошков выбираются из таблиц 4,5.

Таблица 4 [ 5 ]

Радиусы скругления абразивных зерен

Номера зернистости	3	6	10	12	16
$\rho;$ мкм	4	5	6	7	9

Таблица 5 [ 5 ]

Коэффициенты заполнения порошков карбида бора

Номера зернистости	3	6	10	12	16
$K_{\text{об}}^{-1}$	1,55	1,22	1,33	1,48	1,6

$$R8 = \rho = 6 \text{ мкм}$$

$$K0 = K_{06} = 1,33^{-1}$$

Эмпирические коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_\Phi$  характеризующие физико-механические свойства материалов наиболее часто подвергающиеся ультразвуковой обработке даны в таблице 6.

Таблица 6 [5]

Эмпирические коэффициенты, характеризующие свойства обрабатываемых материалов

Обрабатываемый материал	$K_1 \cdot 10^3$ , м/Н	$K_2 \cdot 10^{-2}$ , Н/м <sup>2</sup>	$K_\Phi$
Стекло	1,7	1,75	152
Кварц	1,17	10,01	202
Твердый сплав ВК15	0,48	21,0	2590
Керамика	1,3	6,51	475
Феррит	3,2	13,3	49

$$K1P = K_1 = 0,48 \cdot 10^{-5} \text{ м/Н};$$

$$K2 = K_2 = 21 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2;$$

$$KF = K_\Phi = 2590;$$

$$K1R = K_1 = 1000;$$

$$K2R = K_{II} = 6,1;$$

$$K11R = K_{III} = 0,228;$$

$C = 1,133 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$  – электрохимический эквивалент твердого сплава ВК15

$$H = \eta = 0,589 \cdot 10^{-9} \text{ м/Н};$$

$$EXP = 2,718;$$

$$L1 = ln = lk = 0,12 \text{ м};$$

$$L = ln = 0,11 \text{ м}.$$

Постоянные затухания преобразователя, промежуточного концентратора и концентратора-инструмента определены в работе З.И.Полякова [11]:

$$B27 = \beta_k = 0,4 \text{ м}^{-1};$$

$$B11 = \beta_k = \beta_n = 0,0052 \text{ м}^{-1};$$

$$W1 = W_{0(1)} \cdot F_1 = 40,4 \cdot 10^6 \cdot 7 \cdot 10^{-4} = 282900 \text{ Н} \cdot \text{с/м};$$

$$W3 = W_{0(3)} \cdot F_3 = 40,4 \cdot 10^6 \cdot 12,56 \cdot 10^{-4} = 30566 \text{ Н} \cdot \text{с/м};$$

$$W4 = W_{0(4)} \cdot F_4 = 40,4 \cdot 10^6 \cdot 32,15 \cdot 10^{-4} = 130000 \text{ Н} \cdot \text{с/м};$$

$$W5 = W_n \cdot W_{0(5)} = 43,5 \cdot 10^6 \cdot 30,25 \cdot 10^{-4} = 131587 \text{ Н} \cdot \text{с/м}.$$

Удельные акустические сопротивления даны в таблице 7.

Таблица 7 [ 13 ]

## Удельные акустические сопротивления различных материалов

Материал	Плотность $\rho$ , $H/m^3 \cdot 10^4$	Модуль Юнга $E$ , $Па \cdot 10^7$	Скорость продольных волн $V_L, (м/с) \cdot 10^3$		Удельное волновое сопротивление $W_0$ , $Па \cdot с / м \cdot 10^6$
			В стержне	В неограниченной среде	
Алюминий	2,7	7100	5,08	6,32	13,7
Вольфрам	19,1	35000	4,31	5,46	82,3
Железо сталь	7,8	21000	5,17	5,85	40,4
Никель	8,86	20540	4,78	5,63	42,5
Сплав пермендюр	8,2	-	5,30	-	43,5
Чугун	7,7	-	3,85	4,50	28,7
Стекло кронглас	2,5	7200	5,30	5,66	13,26

Время счета оптимальных режимов составило около 1 минуты. В результате были получены расчетные значения максимальной производительности совмещенной УЗ и ЭХ обработки твердого сплава  $M_{\text{совм}} = 6,53 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ , которой соответствуют следующие оптимальные режимы обработки:

$$RA = A = 46,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}; X = K_{\text{опт.}} = 4;$$

$$IQ = Q_{\text{опт.}} = 116 \text{ Н};$$

$$IR = i = 25 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2.$$

По найденному оптимальному усилию подачи устанавливаемого рабочего значение:

$$Q_{\text{раб.}} = Q_{\text{опт.}} + Q_{\text{уд.}} \cdot F_{\text{и}} = 256 \text{ Н}$$

Диаметр комельной части концентратора-инструмента  $D_2$  определяем по следующим зависимостям:

$$X = \frac{W_2}{W_1} = 4 = \frac{D_2^2}{D_1^2}; \quad D_2 = \sqrt{4 \cdot D_1^2} = 62,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Изготавливаем концентратор-инструмент  $D_{\text{вх}} = 62,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $D_{\text{вых.}} = 31,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $d_{\text{внутр.}} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $L = 120 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

и с его помощью производим совмещенную обработку твердосплавной пластины. При использовании найденных оптимальных режимов получена скорость съема  $6,08 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$  при рабочей амплитуде  $46 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ; т.е. точность расчета максимальной производительности составила 7%. Для сравнения производилась совмещенная обработка отверстия диаметром  $31,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  в детали из

твердого сплава при режимах, найденных по известной методике [10]. Получена скорость съема  $M_{\text{совм.}} = 4,78 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ . Таким образом, использование данной методики расчета режимов совмещенной УЗ и ЭХ обработки твердосплавной технологической оснастки позволяет увеличить производительность в среднем на 25-30% и снизить себестоимость изготовления.

**Выводы.** Разработанный расчетный метод определения оптимальных технологических режимов совмещенных УЗ и ЭХ обработки твердых сплавов позволяет по сравнению с применяемым на практике графическим и экспериментальным методами очень оперативно на ЭВМ определять режимы соответствующие максимально возможной производительности. А это в условиях относительно большой энергоемкости процесса совмещенной обработки делает ее еще более конкурентоспособной по сравнению с альтернативными методами обработки точных отверстий твердосплавной технологической оснастки (электроискровой обработки, электроалмазному шлифованию и др.).

Предлагаемая методика расчета применима при совмещенной обработке твердосплавных деталей на серийно выпускаемых станках мод. 4Б772 и его новых модификациях, например, 4Д772Э и других, предназначенных для совмещенной ультразвуковой и электрохимической обработки твердых сплавов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ревенко Ю.М. Повышение эффективности обработки совмещенным ультразвуковым и электрохимическим способом. – Днепродзержинск, 1980. – 6 с. Рукопись представлена Днепродз.инд. ин-том. Деп. В УкрНИИНТИ 11 марта 1980, № 2068.
2. Ревенко Ю.М. Исследование совмещенной ультразвуковой и электрохимической размерной обработки твердосплавных деталей // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 6 (29). – Днепропетровск, 2004. – С. 29-39.
3. Ревенко Ю.М. Определение доли ультразвуковой и электрохимической составляющих в производительности совмещенной обработки твердых сплавов // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4 (33). – Дніпропетровськ, 2004. – С. 66-71.
4. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1968. – 367 с.
5. Вшивцов А.В. Выбор режимов максимальной производительности размерной ультразвуковой обработки. – Автореф. канд. дисс. – Челябинск, 1975. – 24 с.

6. Вшивцов А.В., Поляков З.И., Ревенко Ю.М. Разрушение хрупких материалов при импульсных контактных нагрузках. – Технология машиностроения. –Тула: ТПИ, 1974, Вып. 34, с. 168-174.
7. Вшивцов А.В. Выбор режимов максимальной производительности размерной ультразвуковой обработки. – Дис. канд.техн.наук.– Челябинск, 1975. – 238 с.
8. Новые технологические процессы электрофизико-химической обработки. Руководящие рекомендации ЭНИМСа. – М. – 1973. – 30 с.
9. Манин М.И., Мечетнер Б.Х. Особенности настройки и эксплуатации станков мощностью 1,5 кВт для ультразвуковой и электрохимической обработки твердых и хрупких материалов. – М.: ЭНИМС, 1969. – 32 с.
10. Мечетнер Б.Х., Манин М.И. Ультразвуковая и комбинированная ультразвуковая и электрохимическая обработка деталей на станке мощностью 1,6 кВт. Технологическое руководство. – М.: ЭНИМС, 1978. – 60 с.
11. Поляков З.И., Вшивцов А.В. К расчету производительности ультразвукового резания. – Научные основы автоматизации производительных процессов в машиностроении и приборостроении: материалы 4-й Всесоюзной конференции. – М., 1974, с.30-35
12. Пономарев С.Д. Расчеты на прочность в машиностроении. – М.: Машигиз, 1958, Т. 2. – 974 с.
13. Теумин И.И. Ультразвуковые колебательные системы–М.:Машгиз, 1959.–259с.

Получено \_\_.\_\_.2006 г.