

## Моделирование очистки поверхностей потоком абразивных частиц

Описаны особенности использования системы математического моделирования, которая включает математическое моделирование, разработку конструктивно-технологических предложений и оптимизацию параметров оснастки при создании технологической оснастки для очистки поверхностей потоком абразивных частиц на примере очистки отверстий малого диаметра в деталях гидравлического привода.

Оценка и подтверждение адекватности математической модели выполнено с помощью критерия проверки соответствия для малых выборок. В качестве критерия оптимизации принята интенсивность съема материала с элементарной площадки поверхности при суммарном воздействии достаточно большого количества абразивных частиц. Оптимизируемыми технологическими параметрами являются величины зернистости абразива и скорости частиц потока, обеспечивающие максимальную интенсивность съема материала. Технической документацией не предусматриваются специальные требования к величине шероховатости поверхности отверстий, поэтому в условиях данной задачи ограничение по шероховатости принимает особый вид условия невозрастания шероховатости при обработке. Установленные конструктивно-технологические параметры оснастки, обеспечивающие стабильное получение однородных очищенных внутренних поверхностей поршней аксиально-поршневых гидромашин, использованы в конструкции оснастки и технологии ее применения. В технологический процесс изготовления поршней на заводе-изготовителе аксиально-поршневых гидромашин введена операция очистки отверстий после химико-термической обработки с использованием предложенной технологической оснастки.

Такой подход является универсальным по отношению к форме поверхностей и виду математической модели, обеспечивает необходимый уровень точности и позволяет эффективно решать практические задачи создания технологической оснастки для повышения качества очистки поверхностей.

**Ключевые слова:** моделирование, очистка, поверхность, поток, абразив, оснастка.

**Д**ля очистки поверхностей деталей после термической и химико-термической обработки может эффективно использоваться обработка потоком абразивных частиц, которая реализуется с помощью специальной технологической оснастки. Для создания такой оснастки следует применять систему математического моделирования [1, 4, 5], которая включает:

- математическое моделирование (целесолагание, идеализацию, формализацию, идентификацию, проверку адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров оснастки.

Рассмотрим основные общие методические особенности решения подобной задачи.

### Математическое моделирование

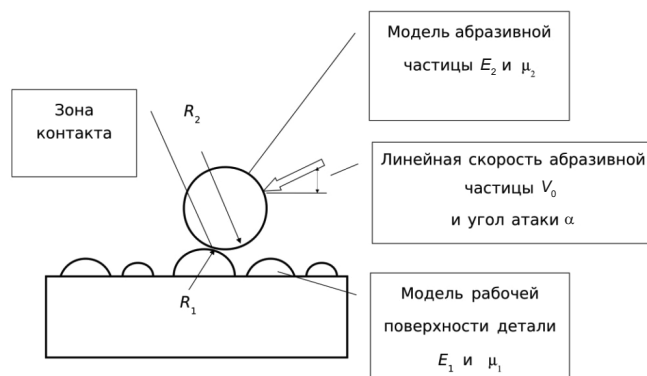
**Целесолагание.** Создать математическую модель, учитывающую основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на результаты использования оснастки. Погрешность моделирования не более 5 %. Стоимость моделирования не должна превышать 5 % стоимости продукции, для изготовления которой используется оснастка.

**Идеализация.** Процесс очистки упрощенно можно рассматривать как многократное контактное взаимодействие поверхности детали и элементов абразивного потока, которое может быть описано универсальной математической моделью, основанной на

модели [1] элементарного единичного акта контактного взаимодействия (рисунок). Модель включает четыре блока:

- модель обрабатываемой поверхности;
- модель абразивного потока;
- модель кинематических и динамических особенностей взаимодействия;
- модель изменения свойств поверхности после взаимодействия.

Учитывая практически однородный характер явлений, исследовался съем материала с элементарной площадки поверхности при воздействии отдельных  $g_i(d, v)$  абразивных частиц. Основными технологическими параметрами являются величины зернистости



**Рис. 1.** Упрощенная схема элементарного единичного акта контактного взаимодействия

абразива ( $d$ ) и скорости частиц потока ( $v$ ). Особенностью изучаемого процесса является случайный характер этих величин. Многократное воспроизведение единичных актов (500) позволяет оценить взаимодействие при очистке во времени. При этом параметры поверхности, абразивной частицы (принимается в виде сферы) и абразивного потока для единичного акта определяются как реализации случайных величин с нормальным законом распределения вероятностей с соответствующими параметрами.

**Формализация.** В основе математической модели, позволяющей оценивать величину съема материала, лежит [1] модель Герца, определяющая значения (1) максимального сближения  $X_{\max}$  с учетом деформирования пропорционального твердости контактирующих поверхностей (рисунок) в виде сферических сегментов с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  по формуле:

$$X_{\max} = \left( \frac{5mV_0}{4\beta} \right)^{2/5},$$

$$\beta = \frac{2E_1E_2}{3E_1(1-\mu_2^2) + E_2(1-\mu_1^2)} \sqrt{\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса абразивной частицы;  $V_0$  – линейная скорость абразивной частицы;  $E_1$  и  $E_2$ ,  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих поверхностей, соответственно.

Оценкой величины съема материала (2) со сферического элемента является объем шарового сегмента, имеющего высоту стрелки, равную половине величины деформации элемента при контактом взаимодействии, при условии, что напряжения при контактом взаимодействии превосходят допустимые напряжения среза для конкретного материала:

$$G = \frac{\pi}{12} (4X_{\max}^3 + 6R_{1,2}X_{\max}^2). \quad (2)$$

Выходные переменные математической модели при достаточно большом (не менее 100) количестве реализаций являются случайными величинами, имеющими нормальный закон распределения вероятностей, что соответствует общим положениям математической статистики. С помощью базовой математической модели, которая учитывает геометрические и физико-механические свойства поверхности ( $T_1$  – твердость материала детали) и абразивной частицы ( $T_2$  – твердость материала частицы), особенности контактного взаимодействия, съема материала и случайный характер переменных можно получить оценки (2) и (3) математического ожидания  $G$  и среднего квадратического отклонения  $\sigma_G$  величины съема материала:

$$\sigma_G = \frac{1}{6} G \left[ \frac{12\Delta m}{5m} + \frac{12\Delta V_0}{5V_0} + \frac{6}{5(R_1+R_2)} \left( \frac{R_2}{R_1} \Delta R_1 + \frac{R_1}{R_2} \Delta R_2 \right) + \frac{3(\Delta T_1 + \Delta T_2)}{T_1 + T_2} \right] \quad (3)$$

**Идентификация.** Для определения численных значений параметров математической модели (что и составляет суть идентификации) необходимо конкретизировать свойства объекта очистки. Например, для очистки осевых отверстий малого диаметра (две ступени диаметром 1 и 2 мм общей длиной 45 мм) в плунжерах аксиально-поршневых гидравлических машин параметры могут быть установлены на основании априорной (эмпирической и справочной) информации.

**Проверка адекватности.** Для количественной оценки соответствия модели съема материала, использован интегральный (учитывающий две основные выходные переменные) показатель (4):

$$\Delta_{\Sigma} = \left( \left| \frac{R_z^a - R_z^p}{R_z^a} \right| + \left| \frac{G_n^a - G_n^p}{G_n^a} \right| \right) \cdot 100, \quad (4)$$

где  $R_z^a$  и  $G_n^a$ ,  $R_z^p$  и  $G_n^p$  – величины шероховатости и съема, полученные при натурном и имитационном экспериментах, соответственно.

Сравнение значений показателя (4) с помощью критерия [2] проверки соответствия для малых выборок (табл. 1) подтверждает наличие адекватности.

Математическое моделирование позволило определить основные особенности абразивной обработки, а также направления и принципиальные решения при создании специальной технологической оснастки.

Таблица 1

#### Результаты проверки адекватности

Варианты экспериментов	Выходная переменная модели	$\xi_{\max}$	$\xi_{\min}$
1	2,99458	3,031	2,749
2	3,06402	3,101	2,819
3	2,23457	2,271	1,989
4	2,88934	2,921	2,639

**Разработка конструктивно-технологических предложений.** Для гарантированной очистки поверхностей отверстий малого диаметра 0,6±2 мм после химико-термической обработки (в частности, азотирования) прецизионных деталей гидравлического привода предложена [5] специальная технологическая оснастка, которая реализует результаты математического моделирования. Комплект обрабатываемых деталей (18 штук) устанавливается на специальных ложементов и погружается в суспензию абразива определенной концентрации. Гидроабразивный поток в течение заданного времени проходит через отверстия в деталях и производит очистку поверхностей.

**Оптимизация** конструктивно-технологических параметров использования оснастки основывается на разработанных математических моделях и общих рекомендациях [3] по оптимизации параметров технологических процессов.

В качестве критерия оптимизации принята интенсивность съема материала  $G$  ( $d$ ,  $v$ ) с элементарной площадки поверхности при суммарном воздействии

достаточно большого количества (500) абразивных частиц  $g_i(d, v)$ . Оптимизируемыми технологическими параметрами являются величины зернистости абразива ( $d$ ) и скорости частиц потока ( $v$ ), обеспечивающие максимальную интенсивность съема материала. Технической документацией не предусматриваются специальные требования к величине шероховатости  $R_z$  поверхности отверстий, поэтому в условиях данной задачи ограничение по шероховатости принимает особый вид условия невозрастания шероховатости при обработке.

Таким образом, формулировка задачи оптимизации имеет вид:

$$G(d, v) = \sum_{i=1}^{500} g_i(d, v) \rightarrow \max;$$

$$R_{zi} \leq R_{zi-1}. \quad (5)$$

Начальная область изменения оптимизируемых параметров (табл. 2) установлена с учетом имеющихся сведений, полученных при предварительных натуральных экспериментах на лабораторной установке.

Имитационные эксперименты многократно повторяются с помощью ЭВМ при различных случайных значениях параметров (с заданными законами распределения вероятностей, воспроизводимым специальными датчиками псевдослучайных чисел) для каждого сочетания областей значений параметров.

Выполнение условий оптимизации достигается при шестом имитационном эксперименте (см. табл. 2). Оптимальными значениями технологических параметров являются:

- средний диаметр частиц 50 мкм (соответствует стандартной зернистости – 100 мкм);
- средняя скорость абразивных частиц – не менее 70 м/с.

Установленные конструктивно-технологические параметры оснастки, обеспечивающие стабильное получение однородных очищенных внутренних поверхностей поршней аксиально-поршневых гидромашин, использованы в конструкции оснастки и технологии ее применения. В технологический процесс изготовления поршней на заводе-изготовителе ак-

### Последовательность оптимизации

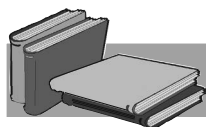
Уровни	Средний диаметр частиц, мкм	Средняя скорость потока, м/с	Съем металла, кг
Верхний	32	65	
Нижний	23	55	
1	+	+	$1,040322 \cdot 10^{-10}$
2	-	+	$0,325995 \cdot 10^{-10}$
3	+	-	$0,776445 \cdot 10^{-10}$
4	-	-	$0,196988 \cdot 10^{-10}$
Параметры градиента			
	$0,3234 \cdot 10^{-10}$	$0,9822 \cdot 10^{-10}$	
Шаг движения по градиенту			
	7	2,35	
Движение по градиенту			
5	39	67,35	$2,171544 \cdot 10^{-10}$
6	46	69,7	$3,918538 \cdot 10^{-10}$

сиально-поршневых гидромашин введена операция очистки отверстий после химико-термической обработки с использованием предложенной технологической оснастки.

Для определения оптимальных условий очистки поверхностей потоком абразивных частиц целесообразно промоделировать процесс с использованием системы математического моделирования, которая включает:

- математическое моделирование (целесообразно, идеализацию, формализацию, идентификацию, проверку адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров оснастки.

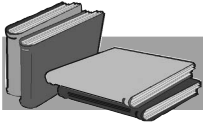
Такой подход является универсальным по отношению к форме поверхностей и виду математической модели, обеспечивает необходимый уровень точности и позволяет эффективно решать практические задачи создания технологической оснастки для повышения качества очистки поверхностей.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Проволоцкий А.Е., Ясев А.Г., Гришин В.С., Маринченко И.А. Имитационное моделирование процесса обработки потоком абразивных частиц // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 1987. – № 4. – С. 112–117.
2. Ясев А.Г. Соответствие математических моделей и технологических процессов в металлургии и машиностроении. – Днепропетровск: Днепр-VAL, 2001. – 237 с.
3. Ясев А.Г. Применение методов оптимизации технологических процессов. С. 163–217 // *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения* / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 8: «Оптимизация технологических процессов в машиностроении». – Одесса: ОНПУ, 2004. – 509 с.
4. Ясев А.Г. Система математического моделирования технологической оснастки для очистки отверстий малого диаметра в деталях элементов гидравлического привода // *Математичне моделювання*. – 2009. – № 2. – С. 34–38.
5. А. с. № 1280814. СССР, МКИ В 24 С 3/16/. Гидроабразивная установка для обработки внутренних поверхностей деталей типа труб / В.Н. Морозенко, И.П. Онуфриенко, А.Е. Проволоцкий, В.П. Капустенко, В.А. Захарченко, А.А. Ворохов, В.С. Гришин, Г.М. Быков, А.Г. Ясев (СССР). – № 3905104/08; Заяв. 16.04.1985.

Поступила 28.01.2019



## REFERENCES

1. Provolotskiy, A.E., Yasev, A.G., Grishin, V.S., Marinchenko, I.A. (1987). Imitation modeling of process of treatment by the stream of abrasive particles. *Izvestiia vusshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, no. 4, pp. 112–117 [in Russian].
2. Yasev, A.G. (2001). Accordance of mathematical models and technological processes in metallurgy and engineering. Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 237 p. [in Russian].
3. Yasev, A.G. (2004). Application methods of optimization technological processes. pp. 163–217. *Physical and mathematical theory of processes of treatment materials and technologies of engineering*. Under a general editorship of F.V. Novikov and A.V. Yakimov. In ten volumes. Vol. 8: "Optimization of technological processes in engineering". Odesa: ONPU, 509 p. [in Russian].
4. Yasev, A.G. (2009). System of mathematical modeling technological equipment for cleaning opening of small diameter in details of elements of hydraulic drive. *Mathematical modeling*, no. 2, pp. 34–38 [in Russian].
5. Morozenko, V.N., Onufrienko, I.P., Provolotskiy, A.E., Kapustenko, V.P., Zakharchenko, V.A., Vorokhov, A.A., Grishin, V.S., Bykov, G.M., Yasev, A.G. (1985). Hydroabrasive equipment for treatments of internal surfaces in details like pipes. A. s. no. 1280814. USSR, MKI B 24 C 3/16/, no. 3905104/08; Declared 16.04.1985 [in Russian].

Received 28.01.2019

### Анотація

**О.Г. Ясев**, канд. техн. наук, проф., проф. кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки, e-mail: [navid@metal.dmeti.dp.ua](mailto:navid@metal.dmeti.dp.ua), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2614-6994>, Researcher ID: 6506486955

*Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна*

## Модельовання очищення поверхонь потоком абразивних часток

Описано особливості використання системи математичного моделювання, що включає математичне моделювання, розробку конструктивно-технологічних пропозицій і оптимізацію параметрів оснащення при створенні технологічного оснащення для очищення поверхонь потоком абразивних часток на прикладі очищення отворів малого діаметра в деталях гідравлічного приводу.

Оцінку і підтвердження адекватності математичної моделі виконано за допомогою критерію перевірки відповідності для малих вибірок. У якості критерію оптимізації прийнято інтенсивність знімання матеріалу з елементарного майданчика поверхні при сумарній дії досить великої кількості абразивних часток. Технологічними параметрами, що оптимізуються, є величини зернистості абразиву і швидкості часток потоку, що забезпечують максимальну інтенсивність знімання матеріалу. Технічною документацією не передбачаються спеціальні вимоги до величини шорсткості поверхні отворів, тому в умовах цього завдання обмеження по шорсткості набирає особливого вигляду умови незростання шорсткості при обробці. Встановлені конструктивно-технологічні параметри оснащення, що забезпечують стабільне отримання однорідних очищених внутрішніх поверхонь поршнів аксально-поршневих гідромашин, використано в конструкції оснащення і технології її застосування. У технологічний процес виготовлення поршнів на заводі-виготівнику аксально-поршневих гідромашин введено операцію очищення отворів після хіміко-термічної обробки з використанням запропонованого технологічного оснащення.

Такий підхід є універсальним по відношенню до форми поверхонь і виду математичної моделі, забезпечує необхідний рівень точності і дозволяє ефективно вирішувати практичні завдання створення технологічного оснащення для підвищення якості очищення поверхонь.

### Ключові слова

Модельовання, очищення, поверхня, потік, абразив, оснащення.

## Summary

**A.G. Yasev**, Candidate of Engineering Sciences, Prof., Professor at the Department of applied mathematics and computer facilities, e-mail: [navid@metal.dmeti.dp.ua](mailto:navid@metal.dmeti.dp.ua), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2614-6994>, Researcher ID: 6506486955

*National metallurgical academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

## Modeling of cleaning surfaces by the stream of abrasive particles

*Utilization of system of mathematical modeling, which consists of mathematical modeling, creation of constructional and technological propositions and optimization parameters of equipment during the creation of technological equipment for cleaning surfaces by the stream of abrasive particles on the example of cleaning holes with small diameters in details of elements of hydraulic machines is described.*

*Estimation and confirmation of adequacy of mathematical model are executed by means of criterion of verification of accordance for small selections. As a criterion of optimization intensity of output of material is accepted from the elementary ground of surface at total influence of plenty enough of abrasive particles. The optimized technological parameters are sizes of grittiness of abrasive and speeds of particles of stream, providing maximal intensity of output of material. Technical documentation is not envisage the special requirements to the roughness of surface of opening, therefore in the conditions of this task limitation on a roughness assumes a special air of condition of ungrowth of roughness at treatment. Set structurally-technological parameters, rigging providing the stable receipt of the homogeneous cleared internal surfaces of pistons of axialpiston hydromashines is used in the construction of rigging and technology of its application. In the technological process of making of pistons on the plant-manufacturer of axialpiston hydromachines the operation of cleaning of opening is entered after chemical-thermal treatment with the use of the offered technological equipment.*

*Such approach is universal in relation to the form of surfaces and type of mathematical model, provides the necessary level of exactness and allows effectively solve the practical tasks of creation of the technological equipment for upgrading cleaning of surfaces.*

## Keywords

*Modeling, cleaning, surface, stream, abrasive, equipment.*