

Система математического моделирования технологической оснастки для очистки отверстий малого диаметра в деталях элементов гидравлического привода

ЯСЕВ А. Г.

Национальная металлургическая академия Украины

Описано использование системы математического моделирования, которая включает математическое моделирование, разработку конструктивно-технологических предложений и оптимизацию параметров оснастки, при создании технологической оснастки для очистки отверстий малого диаметра в деталях гидравлического привода.

Описано використання системи математичного моделювання, котра включає математичне моделювання, розробку конструктивно-технологічних пропозицій і оптимізацію параметрів оснастки, при створенні технологічної оснастки для очистки отворів малого діаметра в деталях гідравлічного привода.

Utilization of system of mathematical modeling, which consist of mathematical modeling, creation constructional and technological propositions and optimization parameters of equipment, during the creation technological equipment for cleaning holes with small diameters in details of elements of hydraulic machines is described.

Постановка проблемы. Детали элементов гидравлического привода [1, 2], как правило, относятся к прецизионным, имеют сложную конструктивную форму (сочетание разных элементарных поверхностей, в том числе отверстий диаметром менее 2 мм) и высокую твердость поверхностей (HRC 50...55). Такие значения твердости достигаются в результате химико-термической обработки, после которой поверхности деталей необходимо очищать от возникающей окалины (обычно трудоемким немеханизированным способом). Для механизации и обеспечения гарантированной очистки труднодоступных поверхностей отверстий малого диаметра можно использовать обработку потоком абразивных частиц с помощью специальной технологической оснастки. Для создания такой оснастки следует применить систему математического моделирования [3], которая включает

- математическое моделирование (целеполагание, идеализация, формализация, идентификация, проверка адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров оснастки.

Целью статьи является решение такой задачи на примере очистки отверстия диаметром 1 мм в плунжере гидравлического насоса.

Математическое моделирование.

Целеполагание. Создать математическую модель, учитывающую основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на результаты использования оснастки для очистки отверстий малого диаметра. 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 контактное взаимодействие поверхности детали и инструмента (гидроабразивного потока), которое может быть описано универсальной математической моделью, основанной на модели элементарного единичного акта контактного взаимодействия (рис. 1). Модель включает четыре блока:

- модель обрабатываемой поверхности;

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

Учитывая симметрию формы обрабатываемой цилиндрической поверхности и практически однородный характер явлений по всей длине отверстия, исследовался сьем материала с элементарной площадки поверхности при воздействии отдельных $g_i(d, v)$ абразивных частиц. Основными технологическими параметрами являются величины зернистости абразива (d) и скорости частиц потока (v). Особенностью изучаемого процесса является случайный характер величины угла атаки каждой отдельной частицы, который воспроизводится при моделировании в виде случайной величины с равномерным (в диапазоне $0-90^0$) законом распределения вероятностей.

Многочисленное воспроизведение единичных актов (500) позволяет оценить взаимодействие при очистке во времени. При этом параметры поверхности, абразивной частицы (принимается в виде сферы) и гидроабразивного потока для единичного акта определяются как реализации случайных величин (как правило, с нормальным законом распределения вероятностей).

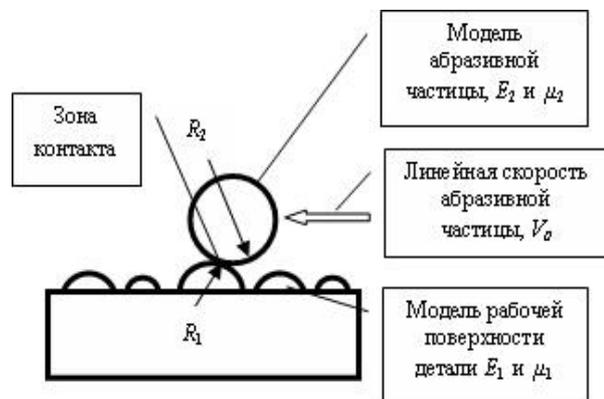


Рис. 1. Упрощенная схема контактного взаимодействия

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

$$X_{max} = \left(\frac{5mV_0}{4\beta} \right)^{2/5}, \quad \beta = \frac{2E_1E_2}{3E_1(1-\mu_2^2) + E_2(1-\mu_1^2)} \sqrt{\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}} \quad (1)$$

где m – масса абразивной частицы; V_0 – линейная скорость абразивной частицы; E_1 и E_2 , μ_1 и μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих поверхностей, соответственно.

Оценкой величины износа 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 ММ 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 σ_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. Численные значения параметров математической модели для очистки отверстий малого диаметра (две ступени диаметром 1 и 2 мм общей длиной 45 мм) в плунжерах аксиально-поршневых гидравлических машин установлены на основании априорной (эмпирической и справочной) информации и приведены в таблицах 2 и 3.

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

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

где R_z° и G_n° , 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 [4] проверки соответствия для малых выборок (таблица 1) подтверждает наличие адекватности.

Математическое моделирование позволило [5] определить основные особенности гидроабразивной обработки, а также направления и принципиальные решения при создании технологической оснастки.

Таблица 1. Результаты проверки адекватности

Варианты экспериментов	Выходная переменная модели	ξ_{max}	ξ_{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 [6, 7] специальная технологическая оснастка (рис. 2), которая реализует результаты математического моделирования.

Перед началом обработки детали 8 устанавливают в приспособление 7 так, что оси деталей располагаются касательно к выпуклости в зоне сопряжения с вогнутыми частями, которые образуются при деформации дна 6 с помощью упора 13. Сопла 10 устанавливают таким образом, чтобы их срез входил в деталь на 0,5÷1 мм. После этого установку заправляют гидроабразивной суспензией 16 до уровня, обеспечивающего затопление обрабатываемой детали 8, криволинейного участка кронштейна 9 и криволинейного участка сопла 10.

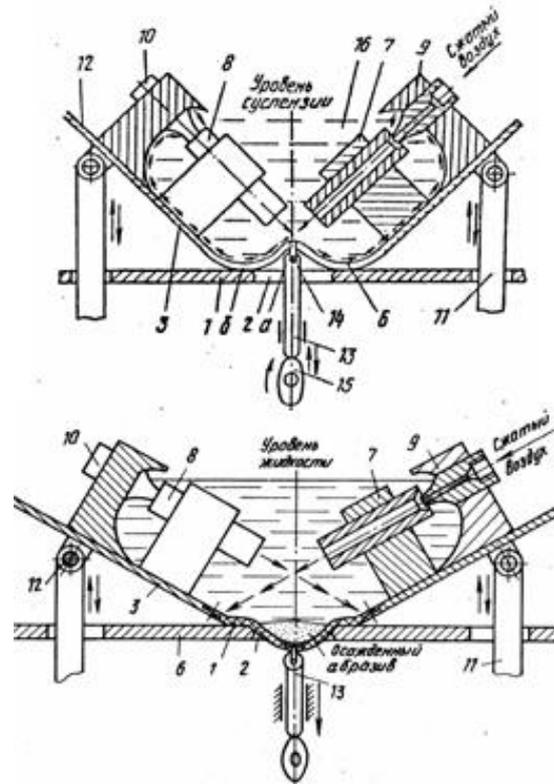


Рис. 2. Схема технологической оснастки для очистки отверстий малого диаметра: 1 – основание; 2 – паз; 3, 4 – стенки камеры; 5 – упруго-эластичный элемент; 6 – упруго-эластичное дно; 7 – приспособления; 8 – обрабатываемые детали; 9 – кронштейны; 10 – сопла; 11 – толкатель; 12, 14 – шарниры; 13 – подвижный упор; 15 – кулачковый механизм; 16 – абразивная суспензия

Сопла подключают к источнику сжатого воздуха (на схеме не показан), который направляет смесь жидкости и воздуха в виде струи касательно к выпуклой части дна 6, и взвешивает находящийся в вогнутых частях абразив. Гидроабразивная смесь, проходя через отверстия в деталях, обеспечивает обработку внутренних поверхностей. Дополнительное перемешивание обеспечивается кулачковым механизмом 15, который задает дну рабочей камеры (через упор 13) возвратно-поступательное движение (с небольшой амплитудой).

После окончания цикла обработки детали 8 промывают от абразивных частиц. Для этого останавливают механизм 15 и придают подвижным элементам устройства положение, соответствующее рис. 2в. При этом абразивные частицы осаждаются, а жидкость, освобожденная от абразивных частиц, в смеси с воздухом промывает детали 8. Затем обработанные детали заменяют новыми и цикл обработки повторяется.

Оптимизация конструктивно-технологических параметров использования оснастки, которая основывается на разработанных математических моделях и общих рекомендациях [8], производится в два этапа [9]:

1. Аналитическая оптимизация основных технологических параметров, определяющих съём материала и изменение шероховатости обрабатываемой поверхности (например, диаметр и скорость абразивных частиц, угол наклона струи и т.п.).

2. Натурная оптимизация основных параметров процесса (длительность обработки, концентрация абразивных частиц, конструктивные параметры оборудования и т.п.) с использованием установленных на первом этапе значений параметров.

В качестве критерия оптимизации принята интенсивность съёма 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 съёма 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 аналитической оптимизации имеет вид:

$$G(d, v) = \sum_{i=1}^{500} g_i(d, v) \rightarrow \max; \quad (5)$$

$$R_{zi} \leq R_{z(i-1)}.$$

Начальная область изменения оптимизируемых параметров (таблица 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.

Оптимальными значениями технологических параметров являются:

- средний диаметр частиц 50 мкм (соответствует стандартной зернистости – 100 мкм);

- средняя скорость абразивных частиц – не менее 70 м/с.

Таблица 2. Ход аналитической 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	$3,918538 \cdot 10^{-10}$

На втором этапе осуществляется [10, 11] натурная оптимизация технологических параметров, которые явно не присутствуют в математической модели. К оптимизируемым параметрам относятся концентрация абразива в суспензии (K), время обработки (τ), диаметр воздушного сопла (D) и расстояние между торцами сопла и плунжера (H). В качестве критерия оптимизации (A) использован показатель (измеряемый в баллах) состояния обработанной поверхности (таблица 3). Формулировка задачи оптимизации имеет вид (с учетом ограничения на достижимую $[P]$ в производственных условиях производительность P):

$$A(K, \tau, D, H) \rightarrow \max; \quad (6)$$

$$P \leq [P]$$

Таблица 3. Ход и результаты натурной оптимизации

Уровни	H , мм	D , мм	K , %	τ , с	Качество очистки
Верхний	0,5	7,8	0,25	600	
Нижний	-0,5	7,3	0,16	300	
1	+	+	+	+	4
2	+	-	+	-	2
3	-	+	+	-	2
4	-	-	+	+	4
5	+	+	-	-	2
6	+	-	-	+	3
7	-	+	-	+	3
8	-	-	-	-	1
Параметры градиента					
	0,125	0,125	0,375	0,875	
Шаг движения по градиенту					
	0,065	0,035	0,02	150	
Движение по градиенту					
9	0,565	7,835	0,28	750	4
10	0,63	7,87	0,29	900	4
11	0,695	7,905	0,31	1050	5
12	0,760	7,940	0,33	1200	5
13	0,825	7,975	0,35	1200	5
14	0,890	8,01	0,37	1200	5

Состояние обработанной поверхности (площадь участков внутренних поверхностей со следами нитридов железа, которые образуются при азотировании поршней и обладают высокой твердостью) контролировалось после продольного разрезания поршней по осевому сечению (что существенно увеличивало трудоемкость и стоимость экспериментальной обработки) и последующего исследования поверхностей с помощью микроскопа.

Выборочная проверка 4 поршней, случайным образом отобранных из 36 обработанных поршней, подтвердила, что поверхности отверстий имеют однородный вид (рис. 3) без следов нитридов и окислов железа.

Оптимальными значениями технологических параметров (с учетом возможностей производственной реализации) являются:

- размер между торцами сопла и плунжера $1_{-0,1}$ мм;
- диаметр воздушного сопла $1^{+0,1}$ мм;
- концентрация абразива в суспензии $0,35 \pm 10\%$;
- время обработки 1200 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 аксиально-поршневых гидромашин введена операция очистки отверстий после химико-термической обработки с использованием предложенной технологической оснастки.

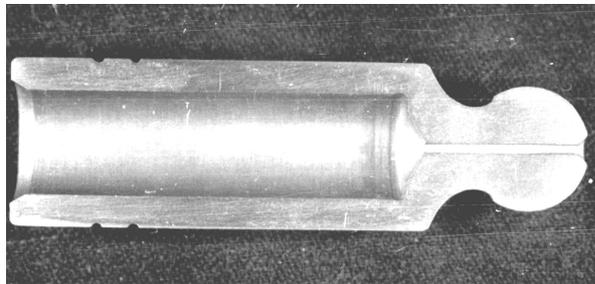


Рис. 3. Вид внутренних поверхностей поршня аксиально-поршневой гидромашин после очистки (разрез; фотоувеличение)

Вывод

Использование системы математического моделирования, которая включает

- математическое моделирование (целеполагание, идеализация, формализация, идентификация, проверка адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров оснастки,

позволяет эффективно решать практические задачи создания технологической оснастки для повышения качества обработки деталей элементов гидравлического привода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Праздников А.В. Гидропривод в металлургии. – М.: Металлургия, 1973. – 336с.
2. Ясев А.Г. Конструктивно-технологические особенности деталей гидромашин // Сборник научных трудов Национальной горной академии Украины. – Днепропетровск: - 2002. - №13, том 3. - с. 159-162.
3. Ясев А.Г. Комплексный метод совершенствования технологической оснастки процессов обработки деталей металлургических машин // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. Том 10. Дніпропетровськ: Системні технології, 2007. – с. 68-82
4. Ясев А.Г. Соответствие математических моделей и технологических процессов в металлургии и машиностроении. - Днепропетровск: Днепр-VAL, 2001. - 237 с.
5. Имитационное моделирование процесса обработки потоком абразивных частиц / А.Е. Проволоцкий, А.Г. Ясев, В.С. Гришин, И.А. Маринченко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 1987. - №4. - С. 112-117.
6. 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; Заявлено 16.04.1985.
7. А. с. № 1797222 СССР, МКИ В 24 С 3/16. Гидроабразивная установка для обработки внутренних поверхностей деталей типа труб / В.Н. Морозенко, А.Е. Проволоцкий, В.С. Гришин, А.Г. Ясев, И.П. Онуфриенко, В.П. Капустенко, А.А. Ворохов, В.А. Захарченко (СССР). - №4098383/08; Заявлено 25.07.86.
8. 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.
9. Проволоцкий А.Е., Ясев А.Г. Комбинированная оптимизация технологических параметров струйно-абразивной обработки деталей машин // Вестник двигателестроения. – 2004. - №3. – С. 69-72.
10. Ясев А.Г. Прогнозирование надежности и оптимизация параметров элементов гидропривода металлургических машин // Системные технологии. - 2002. - №6 (23).- С. 140-147.
11. Гидроабразивная установка для обработки осевых отверстий плунжеров / В.А. Захарченко, А.Е. Проволоцкий, В.С. Гришин, А.А. Ворохов, А.Г. Ясев // Технология авиационного приборостроения и агрегатостроения. - 1990. - №4. - С. 7-9.