

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ВАЛОВ ГИДРОМАШИН

Ясев А.Г., Меженная К.Г. (НМетАУ, г. Днепрпетровск, Украина)

*The concrete cases of grinding of billows of hydraulic machines in real manufacturing process are analyzed in the article, laws of distribution of experimental dates are established, the accuracy of this method of treatment indexes are certain and character of displacement of center of dispersion of sizes is considered.*

Детали гидравлических машин и аппаратуры должны обеспечивать надежное их функционирование в составе приводов различного оборудования. Поэтому к ним предъявляются жесткие конструктивно-технологические требования, а именно: высокая точность конструктивных параметров (допуски размеров на уровне 7-8 квалитетов, допуски на форму поверхностей 1-5 мкм), низкая шероховатость ( $R_a$  0,04-0,32 мкм) и большая твердость рабочих поверхностей (HRC 45-60), применение специальных видов термообработки и финишных методов механической обработки, нанесение антифрикционных покрытий, использование высокопрочных конструктивных материалов (стали марок Х12Ф1-Ш, 20Х3МВФ-Ш, 30Х3ВА, 50ХФА-СШ и др.), которые традиционно относят к группе труднообрабатываемых.

Значения показателей этих свойств, как правило, достигаются на финишных этапах обработки (шлифование, доводка, притирка). Несмотря на большое количество научных работ, посвященных финишной обработке, на практике встречаются определенные трудности стабильного обеспечения характеристик деталей [1,2]. Поэтому исследование точности конкретных вариантов процесса шлифования является актуальным.

Целью данной статьи является исследование точности процесса шлифования деталей гидромашин в условиях реальной технологической системы на предприятии-изготовителе. Для этого решены следующие задачи:

- рассмотрены конструктивно-технологические особенности данного класса деталей;
- собраны и обработаны статистические данные с целью выявления особенностей процесса шлифования наружных цилиндрических поверхностей;
- исследовано смещение центра рассеяния размеров в течении межналадочного периода;
- сделаны выводы о результатах исследования.

Исследование проведено для вала двигателя ДС0.02 (вал I) и вала насоса ДЦН80 (вал II).

### **Конструктивно-технологические особенности обрабатываемых деталей.**

Рассматриваемые валы изготовлены из легированных сталей: вал I – сталь 40Х ГОСТ 4543-71 и вал II – сталь 38Х2НЮА ГОСТ 2590-71. Заготовками для этих деталей является прокат. Основные этапы обработки: черновое и чистовое точение, предварительное и окончательное шлифование, для вала II предусмотрена доводка для обеспечения шероховатости поверхностей  $\varnothing 14$  мм и  $\varnothing 26$  мм  $R_a$  0,16 мкм. Эти детали подвергаются термообработке закалка-отпуск (твердость HRC 30...37). Для вала II предусмотрено азотирование поверхностей  $\varnothing 14$  мм и  $\varnothing 26$  мм. Лимитирующими показателями шлифования по точности и шероховатости для вала I являются  $\varnothing 8f9 \begin{pmatrix} -0.013 \\ -0.049 \end{pmatrix}$ ,  $R_a$  1,25 мкм; для вала II -  $\varnothing 18g7 \begin{pmatrix} -0.006 \\ -0.018 \end{pmatrix}$ ,  $R_a$  0,32 мкм. Основные конструктивные особенности деталей представлены на рисунке 1. Технологические

параметры процесса и инструментов при шлифовании данных деталей (таблица 1) соответствуют рекомендуемым [3].

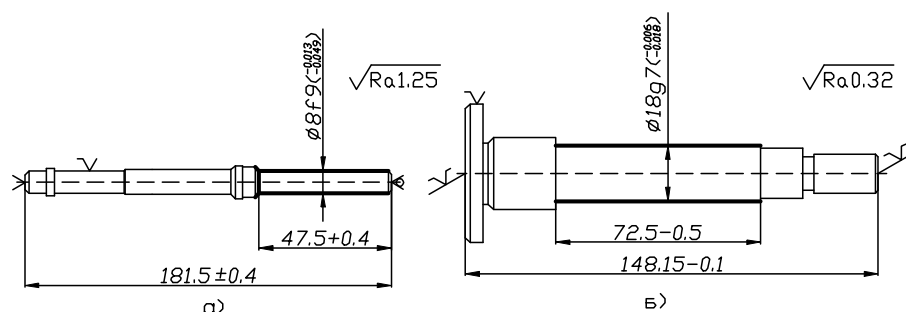


Рисунок 1 – Конструктивные особенности валов гидронасосов

Таблица 1 – Параметры процесса шлифования валов гидронасосов.

	Оборудование	Глубина резания, $t$ , мм	Радиальная подача, $S_{\text{рад}}$ , мм/об	Скорость круга, $V_k$ , м/с	Частота вращения заготовки, $n_{\text{заг}}$ , мин <sup>-1</sup>	Машинное время, $T_m$ , мин
Вал I	ЗМ152МВ Ф2-01	0,25	0,005	55	500	0,12
Вал II	ЗБ12	0,2	0,001	50	350	0,7
Параметры шлифовального круга ГОСТ 2424-83						
Вал I	ПП600x80x305 14A25ПС17K51A55 м/с					
Вал II	ПП600x80x305 16A16ПСМ1K51A55 м/с					

**Сбор и обработка статистической информации процесса шлифования.** Для статистической оценки процесса шлифования вала I была исследована выборочная совокупность состоящая из 100 деталей. При этом в качестве исследуемой величины выбраны действительные размеры обрабатываемых поверхностей. Измерения выполнены с помощью микрометра точностью 0,001 мм ГОСТ 166-83.

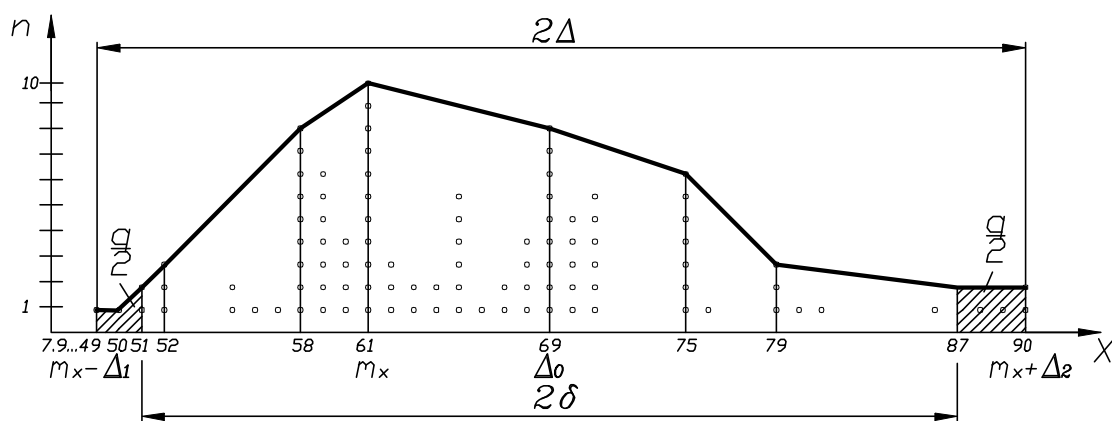


Рисунок 2 – Распределение измеренных размеров вала I

На рисунке 2 представлена эмпирическая кривая распределения размеров по  $\varnothing 89$ . По оси абсцисс откладывались действительные размеры обработанных деталей  $x$ , по оси ординат – количество деталей данного размера  $n$ .

Из рисунка видно, что закон распределения размеров близкий к нормальному. Проверка гипотезы осуществлена с использованием критерия Пирсона  $\chi^2$ . Для проведения расчетов использован статистический аппарат программы Excel. Рассчитаны основные параметры данного распределения: математическое ожидание  $a=7,961$  мм и среднеквадратическое отклонение  $\sigma=8,9698$  мкм.

Вычислена величина критической статистики  $\gamma^{(n)}=7,325314$  [4]. Далее из таблицы [4] найдены 100  $(1-\alpha/2)$ -процентная точка  $\chi^2_{1-\alpha/2}(m-3)$  и 100 $\alpha/2$ -процентная точка  $\chi^2_{\alpha/2}(m-3)$   $\chi^2$ -распределения с  $(m-3)$  степенями свободы,  $m$  – число интервалов группирования,  $m=9$ ;  $\alpha$  - уровень значимости,  $\alpha=0,05$ .

$$\chi^2_{0,975}(6) = 1,237347$$

$$\chi^2_{0,025}(6) = 14,4494$$

Гипотеза о том, что исследуемая случайная величина действительно подчиняется нормальному закону распределения, принимается, так как

$$\chi^2_{1-\alpha/2}(m-3) < \gamma^{(n)} < \chi^2_{\alpha/2}(m-3) \quad (1)$$

$$1,237347 < 7,325314 < 14,4494$$

Однако данное распределение имеет некоторые особенности, поэтому необходимо рассчитать его дополнительные параметры.

Нижний  $Z_1$  и верхний  $Z_2$  квантили, отвечающие уровням вероятности  $q/2$  и  $1-q/2$  [3]:

$$Z_1 = \frac{\Delta_1}{\sigma_x}; \quad Z_2 = \frac{\Delta_2}{\sigma_x}, \quad (2)$$

где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  – расстояния соответственно от нижней и верхней границ поля рассеивания до центра группирования  $m_x$ ;

$\sigma_x$  – среднее квадратическое отклонение поля допуска,  $\sigma_x=6$  мкм.

$$Z_1 = \frac{12}{6} = 2; \quad Z_2 = \frac{29}{6} = 4,83$$

Центр группирования размеров  $m_x=7,961$  мм смещен относительно середины поля допуска  $\Delta_0=7,969$  мм. Несимметричность распределения отклонений случайной величины относительно середины поля допуска характеризует коэффициент относительной асимметрии:

$$\alpha = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\Delta_1 + \Delta_2} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{12 - 29}{12 + 29} = -0,414$$

Для одномодальных распределений, имеющих отрицательный коэффициент относительной асимметрии  $\alpha < 0$  и  $\Delta_1 < \Delta_2$ , среднее значение смещено к левой границе поля рассеивания (что также видно из рисунка 2).

Поле рассеивания размеров  $2\Delta=6\sigma=6\cdot 8,9698=53,82$  мкм выходит за пределы поля допуска  $2\delta=36$  мкм на выполняемый размер. Это означает, что возможно возникновение брака на операции.

Аналогично рассмотрим особенности процесса шлифования вала II.

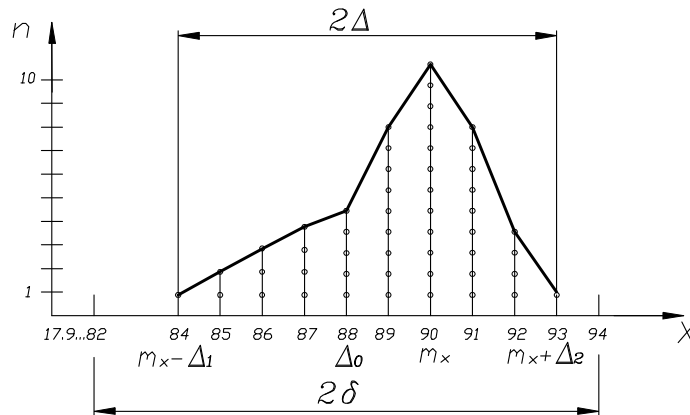


Рисунок 3 – Распределение измеренных размеров вала II

При проверке нормальности распределения полученных эмпирических данных по выборке, составляющей из 50 деталей, было установлено, что значение критической статистики составляет  $\gamma^{(n)}=29,83583$ ,

$$\chi_{0.975}^2(2) = 0,0506356$$

$$\chi_{0.025}^2(2) = 9,3484$$

$29,83583 > 9,3484$  – что свидетельствует о слишком большом отклонении исследуемого закона распределения от нормального при уровне значимости 5%.

Проверим соответствие эмпирических данных  $t$ -распределению Стьюдента.

Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение распределения случайной величины составляют соответственно  $a = 17,90$  мм и  $\sigma = 1,932576$  мкм. Значение критической статистики  $\gamma^{(n)} = 8,633556$ .

$$\chi_{0.975}^2(2) = 0,0506356$$

$$\chi_{0.025}^2(2) = 9,3484$$

$0,0506356 < 8,633556 < 9,3484$  – гипотеза о  $t$ -распределении Стьюдента принимается.

Определяем нижний  $Z_1$  и верхний  $Z_2$  квантили по формуле (2), при этом  $\sigma_x = 2$  мкм:

$$Z_1 = \frac{6}{2} = 3; \quad Z_2 = \frac{3}{2} = 1,5$$

Коэффициент относительной асимметрии рассчитывается по формуле (3):

$$\alpha = \frac{6-3}{6+3} = 0,33$$

Для одномодальных распределений, имеющих положительный коэффициент относительной асимметрии  $\alpha > 0$  и  $\Delta_1 > \Delta_2$ , среднее значение смещено к правой границе поля рассеивания (что видно из рисунка 3).

**Исследование смещения центра рассеивания размеров в течении межналадочного периода.** При обработке деталей точность меняется во времени. Чтобы исследовать процесс изменения точности, необходимо построить смещение центра рассеивания размеров [6,7]. Целесообразным является проследить смещение центра рассеивания размеров деталей в течение межналадочного периода для случая, когда существует вероятность получения брака (обработка вала I).

На предприятии-изготовителе длительность межналадочного периода составляет 50 деталей, и с учетом машинного времени на обработку каждой заготовки данное время составляет  $T=6$  мин. Для определения величины мгновенного рассеивания размеров были измерены размеры первой и 50-ой деталей пяти межналадочных

периодов. Было установлено, что рассеивание размеров подчиняется нормальному закону распределения, поэтому величина мгновенного поля рассеивания рассчитывается по формуле  $\Delta_0=6\sigma_0$ . Результаты измерений и определение мгновенного поля рассеивания размеров представлены в таблице. Процесс смещения центра рассеивания размеров представлен на рисунке 4.

Таблица 2 - Определение мгновенного поля рассеивания размеров

№ п/п	Размеры 1-й детали, мм	СКО $\sigma_0$ , мкм	Поле рассеивания $\Delta_0$ , мкм	Размеры 50-й детали, мм	СКО $\sigma_0$ , мкм	Поле рассеивания $\Delta_0$ , мкм
1	7,954	2,24	13,44	7,984	2,30	13,8
2	7,951			7,988		
3	7,952			7,990		
4	7,948			7,986		
5	7,950			7,985		

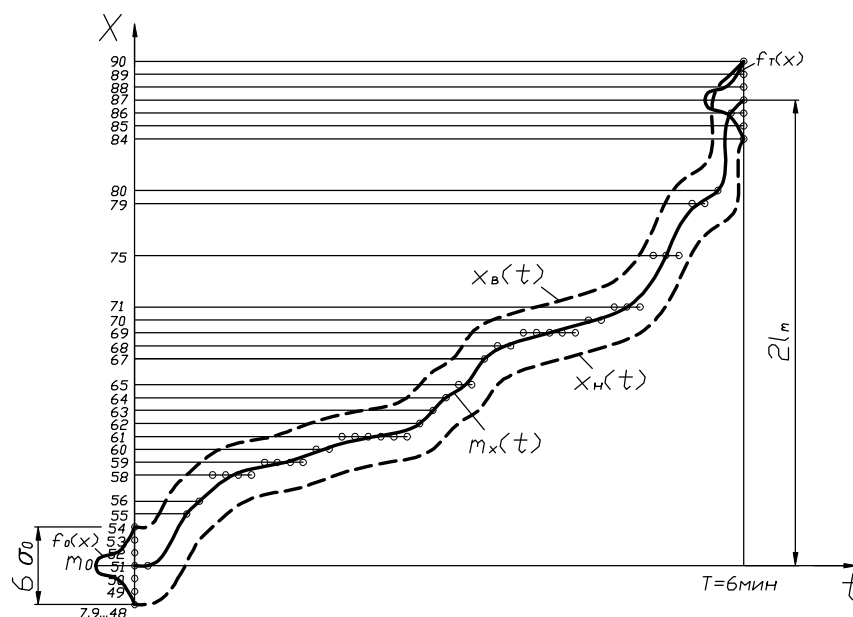


Рисунок 4 - Смещение центра рассеивания размеров при шлифовании

Установлено, что мгновенные поля рассеивания 1-й и 50-й деталей приблизительно равны, поэтому в данном случае имеет место изменение уровня настройки при постоянном мгновенном рассеивании размеров  $\sigma_x(t)=\sigma_0=2,3$  мкм,  $\Delta_0=13,8$  мкм.

Дисперсия суммарной погрешности обработки [3]:

$$\sigma^2(x) = \sigma^2\{m_x(t)\} + \sigma^2\{\sigma_x(t)\} + M^2\{\sigma_x(t)\}, \quad (4)$$

где  $\sigma^2\{m_x(t)\}$  - дисперсия погрешности обработки, вызванная изменением функции математического ожидания, обусловленной влиянием систематических факторов;  $\sigma^2\{\sigma_x(t)\}$  - дисперсия погрешности обработки, вызванная изменением функции среднего квадратического отклонения, обусловленной влиянием случайных факторов, параметры рассеивания которых изменяются с течением времени;  $M^2\{\sigma_x(t)\}$  - дисперсия погрешности обработки, вызванная постоянной составляющей функции

$\sigma_x(t)$ , обусловленной случайными факторами, параметры рассеяния которых не изменяются во времени.

Если поделить обе части выражения (4) на  $\sigma^2(x)$  и заменить составляющие левой части коэффициентами соответственно  $r_m^2$ ,  $r_\sigma^2$ ,  $r^2$ , то получим:

$$r_m^2 + r_\sigma^2 + r^2 = 1 \quad (5)$$

Для установления математической зависимости смещения центра рассеивания во времени использована программа MathCad. На рисунке 5 представлены линейная и степенная линии регрессии, аппроксимирующие закон изменения уровня настройки.

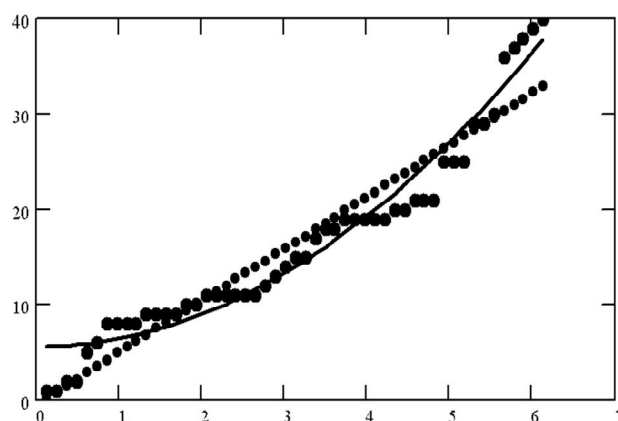


Рисунок 5 - Определение закона изменения уровня настройки

Математические выражения смещения центра рассеивания имеют вид:

- степенная зависимость

$$m_x(t) = 0,896 \cdot t^{1,978} + 5,398 \quad (6)$$

- линейная зависимость

$$m_x(t) = -0.4095 + 5.154t \quad (7)$$

После построения полиномов осуществляем проверку общего качества уравнений регрессии. Рассчитываем коэффициент детерминации  $R^2$  по результатам сравнения фактических значений  $m_x(t)$  и значений, получаемых из уравнений. Коэффициент детерминации подвергается исследованию его статистической значимости. При этом применяется  $F$ -статистика Фишера.

Таблица 3 – Проверка общего качества уравнений регрессии

№ п/п	Вид зависимости	Коэффициент детерминации $R^2$	Значение F-статистики Фишера	Критическое значение критерия Фишера [4]
1	Степенная $m_x(t) = 0,896 \cdot t^{1,978} + 5,398$	0,692	214,1516	$\alpha=0,05$ $F_{кр}(1,48)=14,4$
2	Линейная $m_x(t) = -0.4095 + 5.154t$	0,906	919,1512	

$F > F_{кр}$  – значения  $R^2$  статистически значимы. С вероятностью 0,95 делается вывод об адекватности принятых математических моделей.

Но в литературе [3] предпочтительной считается следующая запись зависимости (3):

$$m_x(t) = m_0 + 2 \cdot l_m \cdot \left(\frac{1}{T}\right)^{1/n}, \quad (8)$$

где  $m_0$  – начальный уровень настройки,  $m_0=7,951$  мм (принимая  $m_0=0$  относительно поля допуска на размер);  $l_m$  – половина диапазона изменения функции  $m_x(t)$ ,  $l_m=18$  мкм.

Для определения значения показателя степени  $n$  приравниваем правые части выражений (5) и (8). При этом  $t$  принимаем равным времени после обработки первой детали  $t=0,12$  мин, межналадочный период  $T=6$  мин. Решаем уравнение относительно  $n$ . Полученное значение  $n=0,8535$  подставляем в выражение (5):

$$m_x(t) = 36 \cdot \left(\frac{1}{T}\right)^{1/0,8535} \quad (9)$$

После этого переходим непосредственно к определению показателей, характеризующих смещение уровня настройки:

$$r_m^2 = \frac{4 \cdot n \cdot \lambda_m^2}{4 \cdot n \cdot \lambda_m^2 + (n+1)^2(n+2)}, \quad (10)$$

$$\text{где } \lambda_m = \frac{l_m}{\sigma_0} = \frac{18}{2,3} = 7,8 \quad (11)$$

$$r_m^2 = \frac{4 \cdot 0,8535 \cdot 7,8^2}{4 \cdot 0,8535 \cdot 7,8^2 + (0,8535 + 1)^2(0,8535 + 2)} = \frac{1106,136}{1106,136 + 9,8031} = 0,991$$

$$r_\sigma^2 = 0 \text{ (при постоянном мгновенном рассеянии размеров)}$$

$$r^2 = \frac{(n+1)^2(n+2)}{4 \cdot n \cdot \lambda_m^2 + (n+1)^2(n+2)} \quad (12)$$

$$r^2 = \frac{9,8031}{1106,136 + 9,8031} = 0,009$$

Полученные значения показателей означают, что доля систематической погрешности, вызванной изменением уровня настройки, в общей погрешности обработки будет наибольшей.

#### Выводы.

1. Распределение размеров обработанных деталей подчиняется нормальному закону или близкому к нормальному ( $t$ -распределение Стьюдента) с уровнем значимости 5%. Параметры распределений представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры распределений полученных размеров при шлифовании валов

№ п/п	Закон распределения	Математическое ожидание $a$ , мм	Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мкм	Ассиметрия $\alpha$
Вал I	Нормальный	7,965	8,9698	-0,414
Вал II	$t$ -распределение	17,99	1,932576	0,33

2. Тенденция к изменению параметров распределения для вала I обусловлена систематической погрешностью, вызванной изменением уровня настройки, величина которой составляет 99,1% от общей погрешности обработки.
3. Для вала I поле рассеивания выходит за пределы поля допуска (возможно возникновение брака на операции).
4. Установленные характеристики могут быть использованы при моделировании отказа данного метода обработки [8].

**Список литературы:** 1. Ясев А.Г. Конструктивно-технологические особенности деталей гидромашин // Сборник научных трудов Национальной горной академии Украины. – 2001. - №13 (т. 3) - С. 159-162. 2. Старков В.К. Рябцев С.А. Беспижоговое шлифование высокоточных деталей гидроприводов // Труды Междунар. конф. «Техника приводов'03» – М., 2003. 3. Справочник технолога машиностроителя под ред. А.М. Дальского – М: Машиностроение, 2001. т.1 – 912с. 4. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. – М.: Металлургия, 1968 – 227с. 5. Маталин А.А. Технология машиностроения. – Л.: Машиностроение, 1985 – 496с. 6. Ишуткин В.И. Технологическая надежность системы СПИД. – М., Машиностроение, 1973 – 128с. 7. Проников А.С. Технологическая надежность станков. – М.: Машиностроение, 1971 – 344с. 8. Ясев А.Г., Меженная К.Г. Моделирование отказа метода механической обработки // Математическое моделирование. – 2007. - №2 (17) – С. 112-115.

Сдано в редакцию 22.05.08