

УДК 621.002.54

С.М. Братан, д-р техн. наук, проф., В.Б. Богуцкий, канд. техн. наук, доц,
А.Л.Бузько, аспирант
ФГБОУ ВПО «Севастопольский государственный университет», Россия
E-mail: serg.bratan@gmail.com

АНАЛИЗ И СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ПОДГОТОВКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАЛЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОПРЯЖЕНИЙ К СБОРКЕ

В статье приведена сравнительная оценка методов подготовки поверхностей малых цилиндрических сопряжений повышенной точности к сборке.

Ключевые слова: прецизионная поверхность, доверительный предел, износостойкость поверхности, доводка, обкатывание.

1. Введение. Методы подготовки поверхностей малых цилиндрических сопряжений повышенной точности к сборке имеют определенную особенность: все финишные операции над посадочными поверхностями выполняются практически на готовых деталях или на целом узле. При этом их себестоимость на данной стадии производства весьма высока. В настоящее время широкое распространение получили такие методы, как притирка и обработка деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД).

Притирка обеспечивает точность поверхностей по 6 качеству и выше и шероховатость до $Ra = 0,063$ мкм. Однако сведения, содержащиеся в литературе о данном методе (в том числе об используемом оборудовании, инструменте и режимах обработки) относятся, в большей части, к случаям доводки деталей средних и крупных размеров [1, 2]. В настоящей же работе внимание будет уделено притирке поверхностей малых (до 8 мм) диаметров.

Цель статьи. Провести сравнительную оценку методов подготовки поверхностей малых цилиндрических сопряжений повышенной точности к сборке.

2. Основное содержание и результаты работы

Обработка деталей методом ППД позволяет добиться увеличения микротвердости, улучшения и повышения износостойкости поверхностей [3, 4].

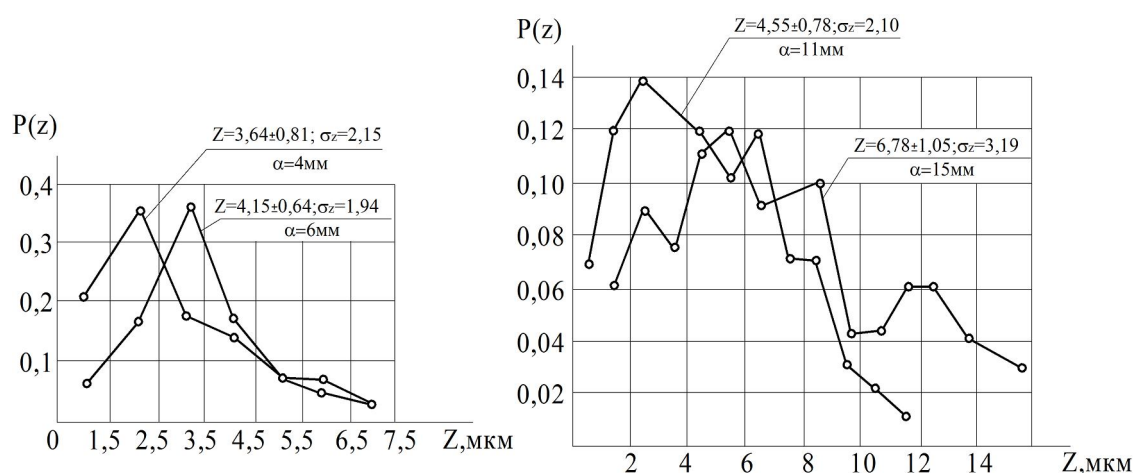


Рис. 1. Полигоны распределения припусков на доводку

Точность обработки при этом зависит от конструктивных особенностей самих деталей, формы и качества исходных поверхностей, а также инструмента, режимов обработки и точности размеров. Исходные поверхности по 5...7 квалитетам точности подвергаются обкатыванию и раскатыванию, что позволяет добиться повышения точности размеров на 10...20 % и уменьшения отклонения формы до 10...30 мкм.

Припуск на доводку может достигать сравнительно больших величин. На рис.1 показаны полигоны распределения припусков z , снимаемых при доводке цапф валов микромашин диаметром 4...6 мм (рис.1,а), и отверстий диаметром 11...15 мм (рис.1,б), выполненных из материала 14X17H2 и 17X18H9. В качестве предварительной обработки применялось шлифование до $Ra=3,2...1,6$ мкм.

Доверительные пределы для средних значений построены по t -критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95 [3].

Для исследования интенсивности съема материала при притирке проведен ряд статистических испытаний. Измерения размеров произведены при помощи оптиметра ИКГ. Результаты испытаний сведены в табл.1.

Дальнейшие расчеты проведены в соответствии с [3].

Таблица 1 Корреляционная таблица результатов испытаний

Время притирки t сек		Припуск Z, мкм									Номера столбцов		
		0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3
											m _t	m _t ·t	m _t ·t ²
2		1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	4
4		1	1	1	1	-	-	-	-	-	4	16	64
6		-	2	3	-	1	-	-	-	-	6	36	216
8		-	-	1	1	-	-	-	-	-	2	16	128
10		-	-	-	-	1	1	1	-	1	4	40	400
12		-	-	-	-	1	1	1	-	2	6	72	864
14		-	-	-	-		-	1	1	-	2	28	392
16		-	-	-	-	2	-	-	-	-	2	32	512
18		-	-	-	-	-	-	1	-		2	36	648
20		-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	20	400
1	n _z	2	3	5	3	5	2	4	1	4	Σ ₌₂₉ ⁽¹⁾	Σ ₌₂₉₈ ⁽²⁾	Σ ₃₆₂₈ ⁽³⁾⁼
2	n _z ·z	1	3	10	9	20	10	24	7	32	Σ (2) = 116		
3	n _z ·z ²	0.5	3	20	27	80	50	144	49	144	Σ (3) = 522.5		
4	Σn _{zt} ·t	6	16	30	24	60	22	54	14	54	Σ (4) = 280		
5	ZΣn _{zt} ·t	3	16	60	72	240	110	324	98	432	Σ (5) = 1355		
6	t _z	3	5.34	6	8	12	11	13.5	14	13.5			

Используя данные табл.1 находим средние значения снимаемого припуска Z и времени на эту процедуру t , корреляцию Czt , средние квадратические отклонения σz и σt , а также коэффициент корреляции Rzt .

$$\bar{z} = \frac{\sum n_z \cdot z}{\sum n_z} = \frac{115}{29} = 3,96 \text{ мкм}; \quad \bar{t} = \frac{\sum m_i \cdot t}{\sum m_y} = \frac{298}{29} = 10,25 \text{ сек};$$

$$C_{zt} = \frac{\sum (Z \sum n_{zt} \cdot t)}{\sum n_z} - \bar{Z} \cdot \bar{t} = \frac{1355}{29} - 3,96 \cdot 10,25 = 6,3$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum n_z \cdot Z^2}{\sum n_z} - Z^2} = \sqrt{\frac{522,5}{29} - 3,96^2} = 1,55;$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum m_t \cdot t^2}{\sum m_t} - t^2} = \sqrt{\frac{3628}{29} - 10,25^2} = 4,70$$

$$R_{zt} = \frac{C_{zt}}{\sigma_z \cdot \sigma_t} = \frac{6,3}{1,55 \cdot 4,70} = 0,86$$

Коэффициент корреляции, характеризующий связь между машинным временем при притирке и припуском, не равен единице. Это объясняется вариацией микротвердости доводимых деталей и боязнью оператора снять слишком большой припуск. По данным отрасли, выпускающей приборы для судостроения, из-за слабой связи Z и t попытки механизировать этот процесс не привели к положительным результатам.

В связи с тем, что отношение величин t и Z не прямолинейно, возникает необходимость проверить процесс на наличие криволинейной связи. Предположим, что здесь присутствует параболическая связь, описываемая уравнением:

$$\bar{Z} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (1)$$

где: a_0, a_1, a_2 - постоянные коэффициенты.

Для нахождения неизвестных параметров уравнения (1) - a_0, a_1, a_2 воспользуемся интерполяционной формулой Чебышева, в которой аргументом является величина

$\chi = t - \bar{t}$, где $\bar{t}_i = \frac{\sum t_i}{n}$ (n - число испытаний):

$$y = k_0 q_0(x) + k_1 q_1(x) + k_2 q_2(x) + \dots \quad (2)$$

Экспериментальные данные для расчета и предварительные расчеты сведены в табл.2. Дальнейший расчет проведен по методике [8].

Определение параболы нулевой степени

$$k_0 = \frac{\sum Z_i}{n} = \frac{42,3}{11} = 3,85 \quad q_0(x) = x^0 = 1, \text{ of}(x) = k_0 q_0(x) = 3.85$$

Основная ошибка σ_0 :

$$\sum = \sum \cdot Z^2 - \frac{(\sum \cdot Z_i)^2}{n} = 235,71 - \frac{42,3^2}{11} = 72,71 \quad \sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_0}{n-1}} = \sqrt{\frac{72,71}{11-1}} = 2,67$$

Определение параметра параболы первой степени:

$$\bar{t}_i = \frac{\sum \cdot t_i}{n} = \frac{110}{11} = 10; ; \quad k_1 = \frac{\sum \cdot Z_i \cdot \chi_i}{\sum \cdot \chi_i^2} = \frac{150}{440} = 0,35;$$

$$q_1(\chi) = \chi^1 = \chi; \quad 1f(\chi) = 0f(\chi) + k_1 q_1(\chi) = 3.85 + 0.35 \chi$$

Основная ошибка σ_1 :

$$\sum_1 = \sum_0 - k_1^2 \sum \chi_i^2 = 72.71 - 0.35^2 \cdot 440 = 18.71 \quad \sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_1}{n-2}} = \sqrt{\frac{18.71}{11-2}} = 1.44$$

Поскольку σ_0 значительно превосходит σ_1 , то продолжаем интерполяцию.

Определение параболы второй степени:

$$A_2 = \frac{\sum \chi_i^2}{n} = \frac{440}{11} = 40; \quad b_2 = \frac{\sum \chi_i^3}{\sum \chi_i^2} = \frac{0}{440} = 0;$$

$$C_2 = \sum \chi_i^4 - b_2 \sum \chi_i^3 - A_2 \sum \chi_i^2 = 31328 - 0 - 40 \cdot 440 = 13728$$

$$k^2 = \frac{\sum \chi_i^2 z - k_0 \sum_i^2 - k_1 \sum_i^3}{C_2} = \frac{1579.2 - 3.85 \cdot 440 - 0}{13728} = 0.00845$$

$$q_2(x) = x^2 - b_2 x - A_2 = x^2 - 40; \quad k_2 q_2(x) = 0.00845(x^2 - 40)$$

Таблица 2 Экспериментальные данные

Время притирки t	Припуск Z, мкм									m_t	\bar{Z}
	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8		
2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,5
4	1	1	1	1	-	-	-	-	-	4	1,4
6	-	2	3	-	1	-	-	-	-	6	2,0
8	-	-	1	1	-	-	-	-	-	2	2,5
10	-	-	-	-	1	1	1	-	1	4	5,7
12	-	-	-	1	1	1	1	-	2	6	5,7
14	-	-	-	-	-	-	1	1	-	2	6,5
16	-	-	-	-	2	-	-	-	-	2	4,0
18	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	6,0
20	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	8,0
n_z	2	3	5	3	5	2	4	1	4	29	
$\sum n_z \cdot t$	6	16	30	24	60	22	54	14	54	280	
\bar{t}_z	3.0	5.34	6.0	8.0	12.0	11.0	13.50	14.0	13.5		

Для определения $f(x)$ сделаем подстановку в соответствии с (2).

После ряда преобразований получим:

$${}_2f(x) = 4.188 + 0.35x - 0.00845x^2 \quad (3)$$

Основная ошибка σ_2 :

$$\sum_2 = \sum_1 - k_2^2 C_2 = 1871 - (-0.00845)^2 \cdot 13728 = 17.735 \quad \sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_2}{n-3}} = \sqrt{\frac{17.735}{11-3}} = 1.42$$

Для получения $Z(t)$ проведем в уравнении (3) замену $x=t-10$. После преобразования получим

$$Z(t) = -0.157 + 0.52t + 0.00845t^2 \quad \begin{cases} 1; t < 20 \\ 0; t > 10 \end{cases} \quad (4)$$

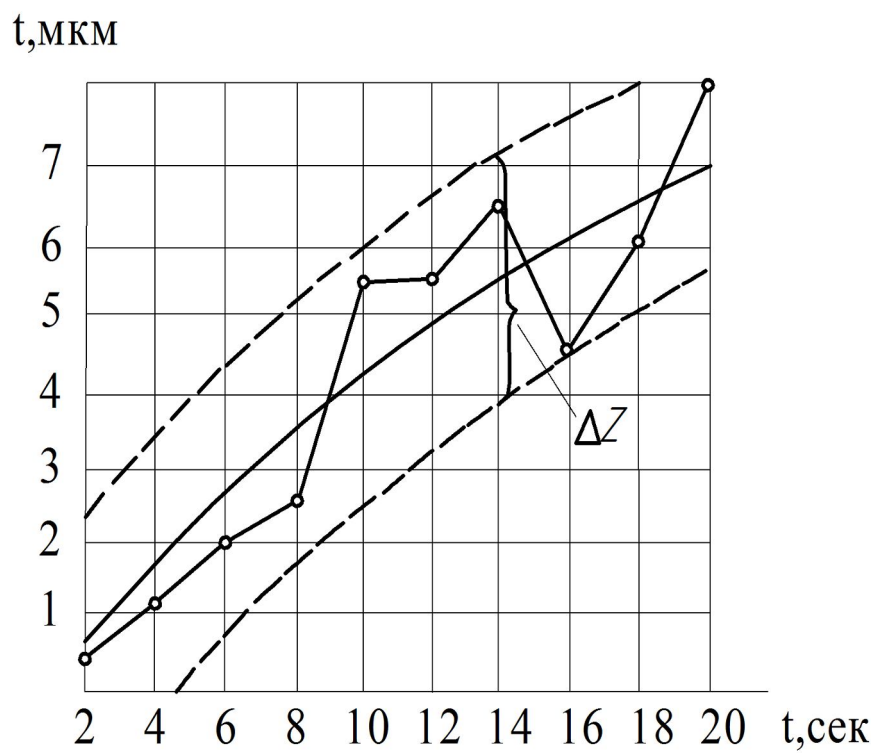


Рис. 2. Интенсивность съема материала при притирке

Графическая интерпретация табл.3 показана на рис. 2.

В табл.3 для сравнения приведены экспериментальные и расчетные значения Z.

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные значения Z

	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$Z_{\text{экс}} \cdot t$	0,5	1,4	2,0	2,5	5,7	5,7	6,5	4,0	6,0	8,0
$Z_{\text{расч}}$	0,85	1,79	2,66	3,49	4,20	4,86	5,48	6,00	6,45	6,86
$\frac{Z_{\text{экс}} - Z_{\text{расч}}}{Z_{\text{экс}}}$	-0,7	-0,2	-0,33	-0,4	0,26	0,15	0,15	-0,5	-0,08	0,14

На рис.2. показаны размахи снятого припуска ΔZ при фиксированных значениях времени t с доверительной вероятностью 0.95.

$$\Delta Z = C \cdot \sigma_2 \quad (5)$$

где ΔZ - отклонение величины снятого металла от средних значений в интересующих интервалах, C - отношение размаха интервала к среднеквадратичному отклонению (в связи с тем, что в отдельных интервалах число случаев меньше 6, то $C = 2,3$), σ_2 - среднеквадратичное отклонение, подсчитанное при выводе уравнения (4).

Широкая доверительная полоса свидетельствует о нестабильности процесса притирки во времени. Это обстоятельство требует большого навыка у оператора и значительно затрудняет механизацию процесса.

Аналогичные эксперименты при использовании в качестве доводочной операции ППД проведены на установке для доводки и восстановления цапф роторов, разработанной на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «Севастопольский государственный университет» (рис.3).

Для экспериментального обкатывания выбраны точеные и шлифованные цапфы $O4...6$ мм, длиной $4...5$ мм из материалов 30X13, 14X17H2, 17X18H9 ($HRC = 26...30$) с исходной шероховатостью $Rz = 3,2...1,6$ мкм. Всего было обкатано 2000 цапф, из расчета $27...30$ цапф на один режим обкатки, что соответствует доверительной вероятности $\beta = 0,95$.

По аналогии с притиркой величина изменения диаметра при обкатывании условно названа удаляемым припуском.

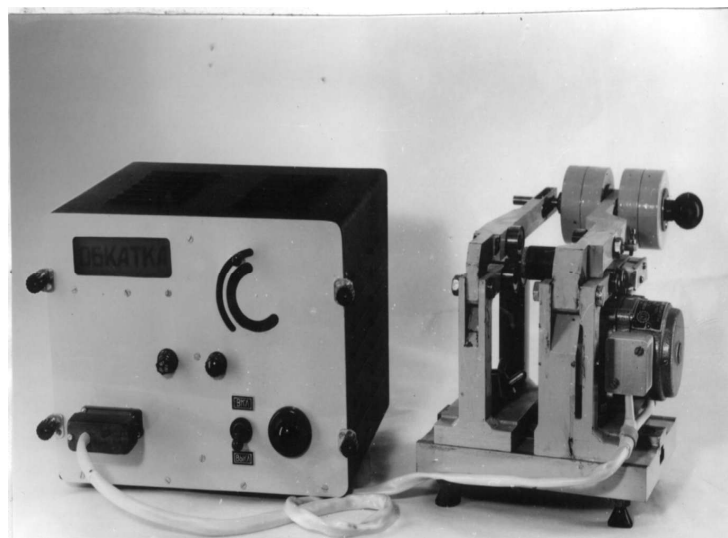


Рис. 3. Общий вид установки для доводки и восстановления цапф роторов микромашин пластическим деформированием

Обкатка точеных цапф. Проведя корреляционный анализ, подобно приведенному выше, найдено, что величина припуска Z и время обкатки t связаны криволинейной зависимостью. Причем, максимальный коэффициент корреляции наблюдается при обкатывании с силами $P = 60...90$ Н.

Таблица 4 Средние экспериментальные значения удаляемого припуска Z (мкм) при обкатывании точеных цапф О4...6 мм

$t, \text{сек}$ $P, \text{Н}$	0	3	6	9	12	15	20	25	40	60	r_{zt}	Доверитель- ный предел при $\beta=0,9$
30	0	0,5	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	0,52	0,57?0,85
60	0	1,2	1,5	2,0	2,1	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	0,78	
90	0	1,5	1,8	2,1	2,5	2,9	3	3	3	3	0,71	
120	0	1,9	2,6	3,3	3,5	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	0,58	
150	0	2,1	3,5	3,9	4,7	5,0	5,1	5,1	5,1	5,1	0,56	
300	0	5,5	6,0	9,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0		
400	0	11	11,5	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0		
500	0	12,5	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7		

В табл. 4 приведены средние экспериментальные значения снимаемого припуска Z при обкатывании, корреляционные коэффициенты r_{zt} и доверительный предел для максимального r_{zt} принятый в соответствии с [3]. Согласно табл. 4 можно утверждать, что снимаемый с рабочим усилием $P < 300 \text{ Н}$ припуск Z зависит от продолжительности обкатки только первые 15 сек. и затем, с увеличением продолжительности обкатки, практически не изменяется. В связи с тем, что при $t > 15 \text{ сек.}$ величины Z и t некоррелированы, коэффициенты корреляции r_{zt} найдены для процесса обкатывания при $t \leq 15 \text{ сек.}$ При обкатывании с усилиями прижатия роликов выше 300Н снятие припуска происходит практически в первые 3...6 сек. Расчеты коэффициентов корреляции r_{zt} доверительных пределов для припуска Z аналогичны приведенным ранее расчетам.

На рис. 4 представлена графическая зависимость Z от времени обкатки экспериментальных и расчетных значений, а также указаны доверительные пределы для припуска Z при усилии обкатки 60 Н.

Дальнейший анализ экспериментальных данных табл. 4 позволил рассчитать зависимость $Z(P)$ при продолжительности обкатки $t = 15 \text{ сек.}$ и доверительные пределы для припуска по методике расчета использованной выше.

$$Z(t) = 0.35t - 0.015t^2 \quad (6)$$

$$\begin{cases} 1; t < 15 \text{ сек}; P = 60 \text{ Н} \\ 0; t > 15 \text{ сек} \end{cases}$$



Рис. 4. Сравнительные данные экспериментальных и рассчитанных по формуле (6) значений удаляемого припуска Z мкм при обкатывании.

На рис. 5 представлена графическая интерпретация расчетной зависимости $Z(P)$, нанесены средние экспериментальные значения и доверительные пределы для припуска Z .

$$Z(P) = 0.18 + 0.0323P \quad (7)$$

$$\begin{cases} 1; & 30 \leq P \leq 300 \text{ Н}; t = 15 \text{ сек} \\ 0; & \text{остальное} \end{cases}$$

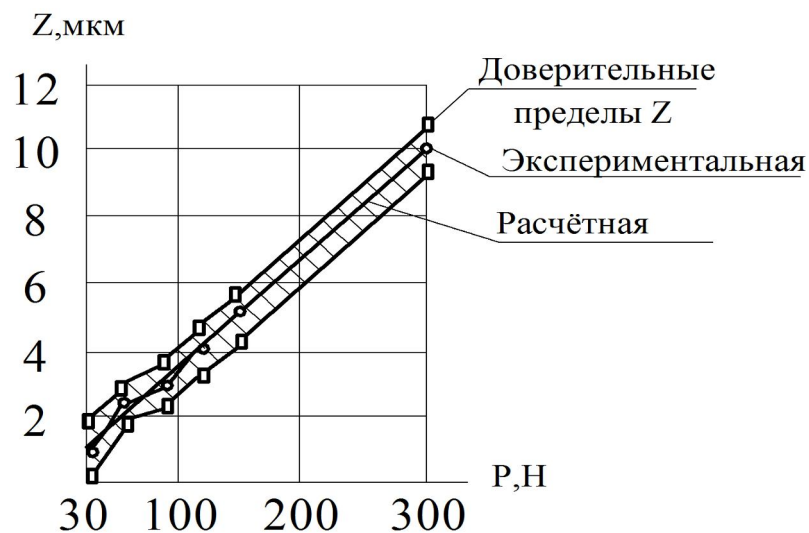


Рис.5. Сравнительные данные экспериментальных и рассчитанных по формуле (7) значений удаляемого припуска Z мкм при обкатывании

На основании полученных данных в строим уравнение множественной регрессии:

$$z = a_1 t + a_2 P + a_3 t \cdot P + a_4 t^2 + a_5 P^2$$

где: a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – коэффициенты регрессии; t – время обкатки; P – усилие обкатки.

Коэффициенты регрессии находим по способу наименьших квадратов

$$U = \sum_{i=1} (Z - Z_i)^2 = U_{\min}$$

где Z_i – экспериментальное значение Z .

Для этого уравнения первые производные равны нулю. Запишем последнее выражение в следующем виде:

$$U = \sum (a_1 t + a_2 P + a_3 t P + a_4 t^2 + a_5 P^2 - Z)^2 = U_{\min}$$

Находим частные производные функции по a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 и приравняем их к нулю.

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial a_1} = 2 \sum (a_1 t + a_2 P + a_3 tP + a_4 t^2 + a_5 P^2 - Z) \cdot t = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial a_2} = 2 \sum (a_1 t + a_2 P + a_3 tP + a_4 t^2 + a_5 P^2 - Z) \cdot P = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial a_3} = 2 \sum (a_1 t + a_2 P + a_3 tP + a_4 t^2 + a_5 P^2 - Z) \cdot P \cdot t = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial a_4} = 2 \sum (a_1 t + a_2 P + a_3 tP + a_4 t^2 + a_5 P^2 - Z) \cdot t^2 = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial a_5} = 2 \sum (a_1 t + a_2 P + a_3 tP + a_4 t^2 + a_5 P^2 - Z) \cdot P^2 = 0 \end{cases}$$

Преобразовав и решив систему уравнений, находим значения коэффициентов регрессии.

Уравнение множественной регрессии будет иметь следующий вид:

$$Z \cdot 10^3 = 96t + 7P + 1,5t \cdot P - 5,5t^2 + 0,02P^2 \quad (8)$$

$$\begin{cases} 1; & t \leq 15 \text{сек}; & P \leq 150H \\ 0; & t \geq 15 \text{сек}; & P \geq 150H \end{cases}$$

На рис.6 показаны графическая интерпретация выражения (8) и экспериментальные точки Z.

Обкатка шлифованных цапф. Корреляционный анализ выявляет криволинейную связь между временем обкатки t и удаляемым припуском Z . Причем, максимальный коэффициент корреляции наблюдается при обкатывании силой $P = 120$ Н. Для данного случая с использованием метода Чебышева получена зависимость удаляемого припуска Z от продолжительности обкатывания. В табл.5 и на рис.7 и рис.8 приведены результаты исследования, выполненные по изложенной выше методике.

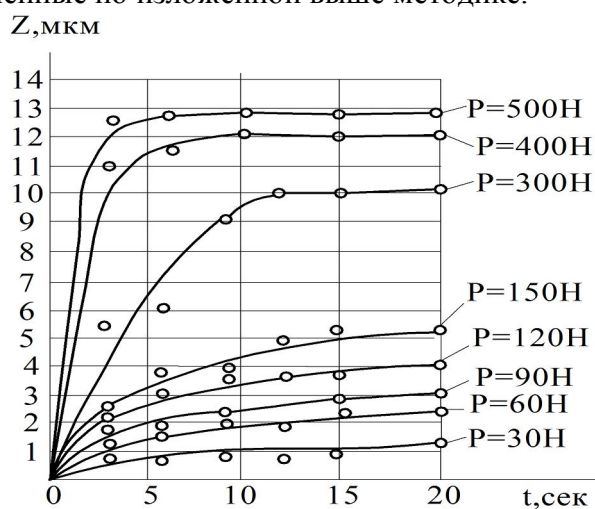


Рис.6. Теоретические и экспериментальные зависимости $Z(t, P)$ при обкатке точеных образцов

Таблица 5. Средние экспериментальные значения удаляемого припуска Z мкм при обкатывании шлифованных цапф О4...6 мм

Сила обкатывания P, H	Время обкатывания t , сек			r_{zt}	Доверительный предел при $\beta=0,9$
	5	10	15		
90	0,9	1,2	1,35	0,7	0,34±0,93
120	1,2	1,35	1,4	0,77	
150	1,35	1,5	1,5		
300	3,00	3,00	3,00		

$$Z(t) = 1.04 + 0.02t \quad (9)$$

$$\begin{cases} 1; & 5 \leq t \leq 15 \text{сек}; P = 120H \\ 0; & \text{остальное} \end{cases}$$

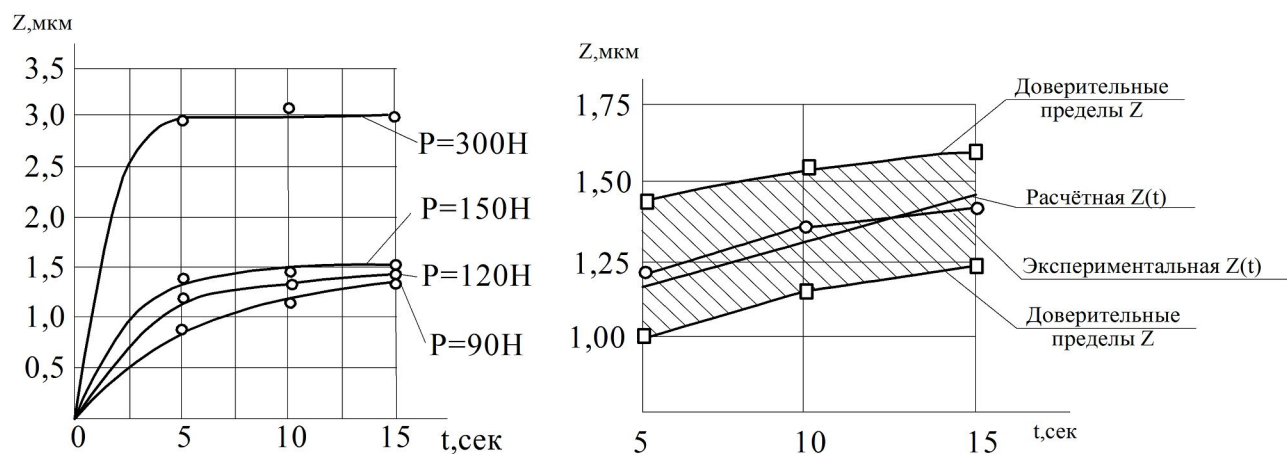


Рис.7. Сравнительные данные зависимости экспериментальных и расчетных значений удаляемого припуска при обкатке от продолжительности процесса

$$Z(P) = 0.04 + 0.011P \quad (10)$$

$$\begin{cases} 1; & 90 \leq P \leq 300H; \quad t = 10 \text{сек} \\ 0; & \text{остальное} \end{cases}$$

Зависимость $Z(P)$ рассчитана для случая, когда максимальная сила прижатия роликов при обкатывании не превышает 300...400Н. При $P \geq 500$ Н наблюдается некоторое ухудшения макрогеометрии цапфы и прямолинейности самих деталей, превышающей допуски на этот параметр.

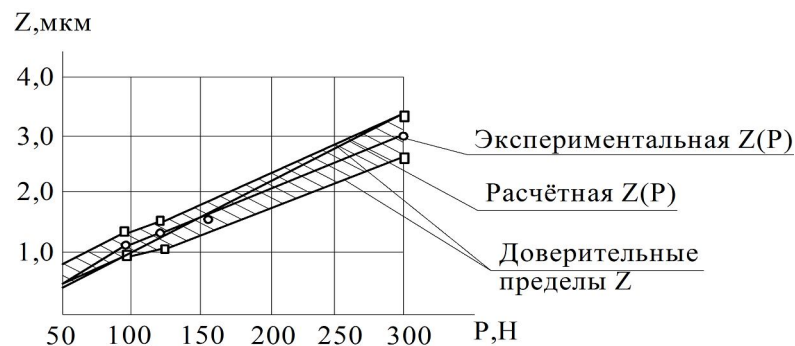


Рис.8. Сравнительные данные экспериментальных и рассчитанных по зависимости (10) значений удаляемого припуска Z при обкатывании с различными усилиями P .

Заключение

1. Исследование методов доводки поступающих на сборку деталей прецизионных пар малых диаметров показало, что в качестве доводочных операций следует рекомендовать обкатку роликами, так как они позволяют при одинаковых с другими методами трудозатратах получить детали, обеспечивающие более высокие эксплуатационные свойства.

2. Установлено, что доводка обкатыванием более управляемый процесс, чем притирка (значения коэффициентов корреляции больше).

3. Получены аналитические выражения зависимости величины удаляемого припуска от режимов доводки.

Представленные в работе результаты справедливы для сталей 1X17H2 и 2X18H9, при использовании других материалов требуются дополнительные исследования, что является дальнейшей задачей исследований в данной области.

Список литературы:

1. Братан С.М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового и тонкого шлифования: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.08: защищена 24.03.2006 : утв. 01.07. 2006 / Братан Сергей Михайлович. – Одесса, 2006. – 321 с.

2. Novoselov, Y. Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding / [Y. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky, Y. Gutsalenko] // Journal Fiability & Durability Supplement. – 2013. – № 1. – P. 5–15. Editura “Academica Brancuși”, Targu Jiu.

3. Писаревский М.И. Накатывание точных резьб, шлицев и зубьев / М.И. Писаревский. – Л.: Машиностроение, 1973. – 200 с

4. Кремер, Н.Ш. Теория вероятности и математическая статистика / Н.Ш. Кремер. М.: Юнити – Дана, 2002. – 343 с.

Надійшла до редколегії 26.12.2014.

S.M.Bratan, V.B.Bogutsky, A.L. Buzko

ANALYSIS AND COMPARATIVE DESCRIPTION OF METHODS OF PREPARATION OF EXACT SURFACES OF SMALL CYLINDRICAL INTERFACES TO ASSEMBLING

The article describes the methods of finishing precision surfaces of small cylindrical connections.

Key words: precision surface, confidence limit, wear surface, Evidence, the running

С.М. Братан, В.Б. Богущкий, А.Л.Бузько

АНАЛІЗ І ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ ПІДГОТОВКИ ПРЕЦИЗІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ МАЛИХ ЦИЛІНДРОВИХ СПОЛУЧЕНЬ ДО ЗБІРКИ

У статті розглянуті методи фінішної обробки точних поверхонь малих циліндрових з'єднань.

Ключові слова: прецизійна поверхня, довірча межа, зносостійкість поверхні, доведення, обкатування.