

УДК 621.002.54

В.Б. Богуцкий, ст. преподаватель*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**root@sevgtu.sebastopol.ua***СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПОСОБОВ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ К СБОРКЕ**

Приведены сравнительные результаты экспериментальных исследований методов доводки точных поверхностей и получены аналитические зависимости удаляемого припуска от режимов доводочных операций.

Ключевые слова: притирка, обкатка, доводка, съём металла, корреляция.

Особенностью методов подготовки поверхностей малых цилиндрических сопряжений повышенной точности к сборке является то, что финишные операции над посадочными поверхностями выполняются над почти готовыми, весьма сложными деталями или на целом узле, себестоимость которых на этой стадии технологического процесса весьма высока. К применяемым в настоящее время методам относятся, прежде всего, притирка и обработка деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД).

Притирка обеспечивает точность поверхностей по 6 качеству и выше и шероховатость до $R_a = 0,063$ мкм. Имеющиеся в литературе сведения о притирке, в том числе об оборудовании, инструменте, режимах относятся, в основном, к случаям доводки деталей средних размеров и выше [1, 2]. Поэтому в настоящей работе уделено внимание доводке поверхностей малых (до 8 мм) диаметров.

Обработка деталей ППД используется для улучшения поверхности, увеличения микротвердости и повышения износостойкости поверхностей [2, 3]. Точность обработки ППД зависит от конструктивных особенностей деталей, инструмента, режимов обработки, точности размеров, формы и качества исходных поверхностей. Обкатыванию и раскатыванию подвергаются исходные поверхности по 5...7 качествам точности. При этом добиваются повышения точности размеров на 10...20 %, уменьшения отклонения формы до 10...30 мкм.

Припуск на доводку может достигать сравнительно больших величин. На рисунке 1 показаны полигоны распределения припусков z , снимаемых при доводке цапф валов микромашин диаметром 4...6 мм (рисунок 1, а) и отверстий диаметром 11...15 мм (рисунок 1, б), выполненных из материала 1Х17Н2 и 2Х18Н9. Предварительная обработка – шлифование до $R_a = 3,2...1,6$ мкм.

Для исследования интенсивности съема материала при притирке проведен ряд статистических испытаний. Результаты испытаний сведены в корреляционную таблицу 1. Дальнейшие расчеты проведены в соответствии с [4].

Используя данные таблицы 1, находим средние значения снимаемого припуска Z и времени на эту процедуру t , корреляцию C_{zt} , средние квадратические отклонения σ_z и σ_t , а также коэффициент корреляции R_{zt} .

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

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

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum n_z \cdot z^2}{\sum n_z} - \bar{z}^2} = \sqrt{\frac{522,5}{29} - 3,96^2} = 1,55 \quad \sigma_t = \sqrt{\frac{\sum m_t \cdot t^2}{\sum m_t} - \bar{t}^2} = \sqrt{\frac{3628}{29} - 10,25^2} = 4,70,$$

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

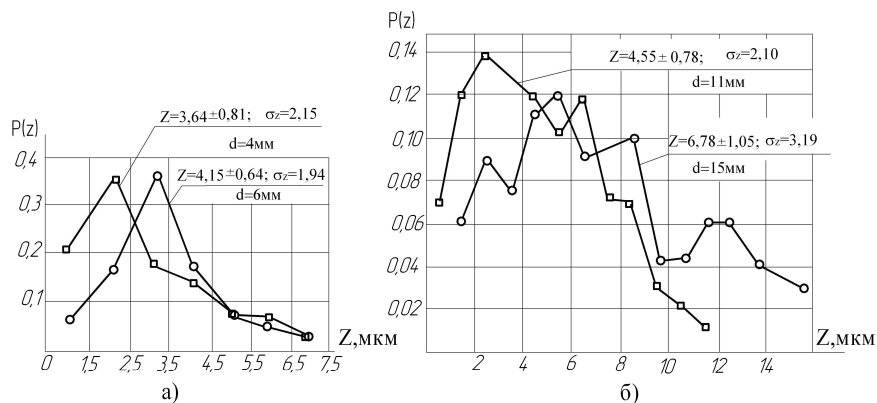


Рисунок 1 – Полигоны распределения припусков на доводку: доверительные пределы для средних значений построены по t – критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95 [6].

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
											m_t	$m_t \cdot t$
2		1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2
4		1	1	1	1	-	-	-	-	-	4	16
6		-	2	3	-	1	-	-	-	-	6	36
8		-	-	1	1	-	-	-	-	-	2	16
10		-	-	-	-	1	1	1	-	1	4	40
12		-	-	-	-	1	1	1	-	2	6	72
14		-	-	-	-	-	-	1	1	-	2	28
16		-	-	-	-	2	-	-	-	-	2	32
18		-	-	-	-	-	-	1	-	-	2	36
20		-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	20
1	n_z	2	3	5	3	5	2	4	1	4	$\sum_{(1)}=29$	$\sum_{(2)}=298$
2	$n_z \cdot z$	1	3	10	9	20	10	24	7	32	$\sum (2) = 116$	
3	$n_z \cdot z^2$	0,5	3	20	27	80	50	144	49	144	$\sum (3) = 522,5$	
4	$\sum n_{zt} \cdot t$	6	16	30	24	60	22	54	14	54	$\sum (4) = 280$	
5	$Z \sum n_{zt} \cdot t$	3	16	60	72	240	110	324	98	432	$\sum (5) = 1355$	
6	$\bar{t}_z$	3	5,34	6	8	12	11	13,5	14	13,5		

Коэффициент корреляции, характеризующий связь между машинным временем при притирке и припуском, не равен единице, что можно объяснить 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 связь между t и Z не прямолинейна, следует проверить процесс на наличие криволинейной связи, например, параболической, описываемой 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 и a_2 воспользуемся интерполяционной формулой Чебышева, в которой аргументом является величина $\chi = t - \bar{t}$, где

$$\bar{t}_i = \frac{\sum t_i}{n} \quad (n - \text{число испытаний}):$$

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

Экспериментальные данные для расчета и предварительные расчеты сведены в таблицу 2.

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

$$\sum_1 = \sum_0 - k_1^2 \sum \chi_i^2 = 72,71 - 0,35^2 \cdot 440 = 18,71 \quad \sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_1}{n-2}} = \sqrt{\frac{18,71}{11-2}} = 1,44.$$

Таблица 2 – Экспериментальные данные

Время притирки t	Припуск Z, мкм									m_t	$\sum m_t \cdot Z$	$\bar{Z}$
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8			
2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,5	0,5
4	1	1	1	1	-	-	-	-	-	4	6,5	1,4
6	-	2	3	-	1	-	-	-	-	6	12	2,0
8	-	-	1	1	-	-	-	-	-	2	5	2,5
10	-	-	-	-	1	1	1	-	1	4	23	5,7
12	-	-	-	1	1	1	1	-	2	6	34	5,7
14	-	-	-	-	-	-	1	1	-	2	13	6,5
16	-	-	-	-	2	-	-	-	-	2	8	4,0
18	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	6	6,0
20	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	8	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	13,5	14,0	13,5			

В связи с тем, что σ_0 значительно превосходит σ_1 , продолжаем интерполяцию.

Определение параболы второй степени:

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

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

$$k^2 = \frac{\sum \chi_i^2 Z - k_0 \sum_i^2 - k_1 \sum_i^3}{C_2} = \frac{1579,2 - 3,85 \cdot 440 - 0}{13728} = 0,00845;$$

$$q_2(x) = x^2 - b_2 x - A_2 = x^2 - 40; \quad k_2 q_2(x) = 0,00845(x^2 - 40).$$

Для нахождения $f(x)$ сделаем подстановку в соответствии с (2). После преобразований получим:

$$_2 f(x) = 4,188 + 0,35x - 0,00845x^2. \quad (3)$$

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:

$$Z(t) = -0,157 + 0,52t + 0,00845t^2; \quad \begin{cases} 1; t < 20 \\ 0; t > 10 \end{cases} \quad (4)$$

Графическая интерпретация экспериментальных и расчетных значений Z показана на рисунке 2.



Рисунок 2 – Интенсивность съема материала при притирке

Размахи снятого припуска ΔZ при фиксированных значениях времени t с доверительной вероятностью 0,95:

$$\Delta Z = C \cdot \sigma_z, \quad (5)$$

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_z – 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.

Для экспериментального обкатывания, при использовании в качестве доводочной операции ППД, выбраны точеные и шлифованные цапфы $\varnothing 4...6$ мм, длиной 4...5 мм из материалов 3X13, 1X17H2, 2H8H9 (HRC = 26...30) с исходной шероховатостью $R_z = 3,2...1,6$ 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.

Таблица 3 – Средние экспериментальные значения удаляемого припуска Z (мкм) при обкатывании точеных цапф $\varnothing 4...6$ мм

$t, \text{сек}$ Р, Н	0	3	6	9	12	15	20	25	40	60	r_{zt}	Доверительный 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		

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. В таблице 3 приведены средние экспериментальные значения снимаемого припуска Z при обкатывании, корреляционные коэффициенты r_{zt} и доверительный предел для максимального r_{zt} . Из таблицы 3 видно, что снимаемый с рабочим усилием $P < 300$ Н припуск Z зависит от продолжительности обкатки только первые 15 с и затем практически не изменяется с увеличением продолжительности обкатки. В связи с тем, что при $t > 15$ с величины Z и t некоррелированы, коэффициенты корреляции r_{zt} найдены для процесса обкатывания при $t \leq 15$ с. При обкатывании с усилиями прижатия роликов выше 300 Н

снятие припуска происходит практически в первые 3...6 с. Расчеты коэффициентов корреляции r_{zt} , доверительных пределов для припуска Z аналогичны приведенным ранее расчетам. На рисунке 3 представлена графическая зависимость Z от времени обкатки экспериментальных и расчетных значений, а также доверительные пределы для припуска Z при усилии обкатки 60 Н. Дальнейший анализ экспериментальных данных таблицы 3 позволил рассчитать зависимость $Z(P)$ при продолжительности обкатки $t = 15$ с и доверительные пределы для припуска по методике расчете использованной выше.

$$\begin{cases} 1; t < 15 \text{сек}; P = 60 \text{Н} ; Z(t) = 0,35t - 0,015t^2 \\ 0; t > 15 \text{сек} \end{cases} \quad (6)$$

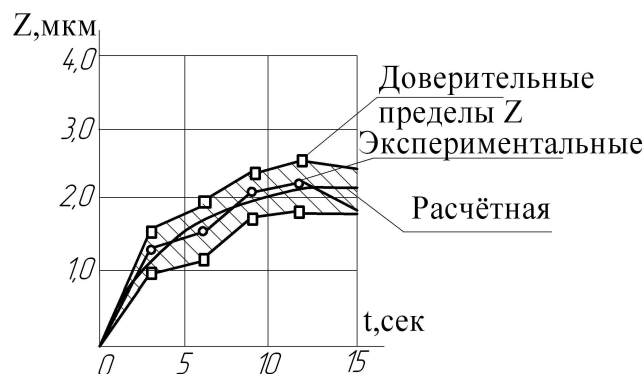


Рисунок 3 – Сравнительные данные экспериментальных и подсчитанных по формуле (6) значений удаляемого припуска Z мкм при обкатывании

На рисунке 4 представлена графическая интерпретация расчетной зависимости $Z(P)$, нанесены средние экспериментальные значения и доверительные пределы для припуска Z .

$$Z(P) = 0,18 + 0,0323P \begin{cases} 1; 30 \leq P \leq 300 \text{Н}; t = 15 \text{сек} \\ 0; \text{остальное} \end{cases} \quad (7)$$

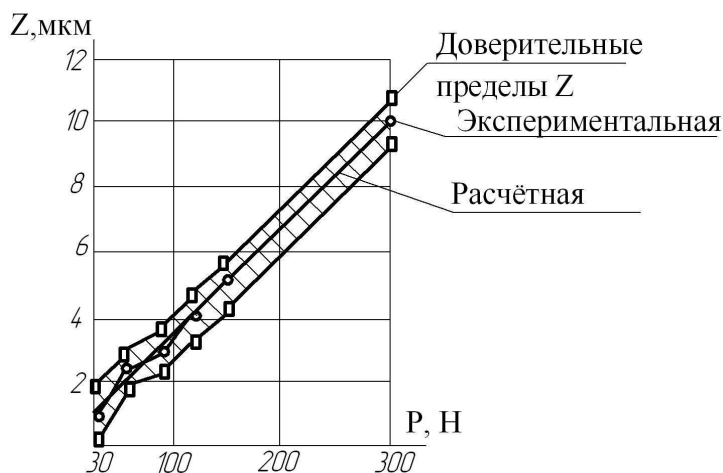


Рисунок 4 – Сравнительные данные экспериментальных и подсчитанных по формуле (7) значений удаляемого припуска Z мкм при обкатывании

На основании полученных данных строим уравнение множественной регрессии:

$$z = a_1 t + a_2 P + a_3 tP + a_4 t^2 + a_5 P^2,$$

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

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

где Z_i – экспериментальное значение Z .

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

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

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

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

Приводя систему уравнений к нормальному виду и решая ее, находим значения коэффициентов регрессии. Уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$Z \cdot 10^3 = 96t + 7P + 1,5t \cdot P - 5,5t^2 + 0,02P^2; \quad \begin{cases} 1; & t \leq 15 \text{сек}; & P \leq 150 \text{Н} \\ 0; & t \geq 15 \text{сек}; & P \geq 150 \text{Н} \end{cases} \quad (8)$$

На рисунке 5 показаны графическая интерпретация выражения (8).

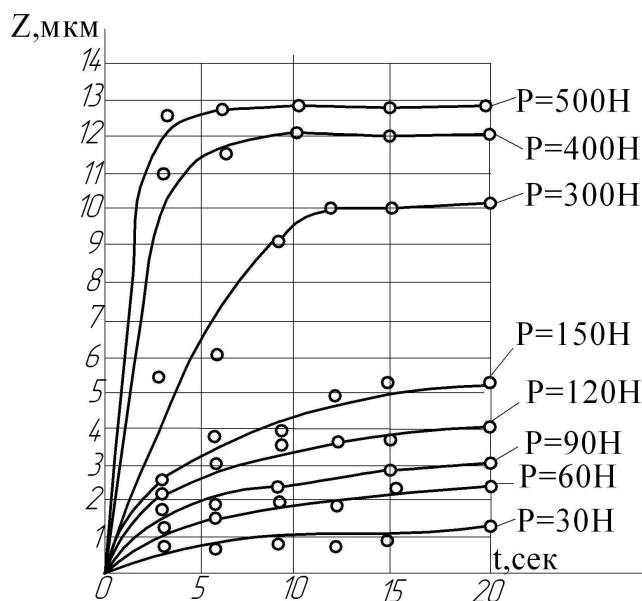


Рисунок 5 – Теоретические и экспериментальные зависимости $Z(t, P)$ при обкатке точеных образцов

Обкатка шлифованных цапф. Корреляционный анализ показывает криволинейную связь между временем обкатки t и удаляемым припуском Z . Причем, максимальный коэффициент корреляции наблюдается при обкатывании силой $P = 120$ Н. Для этого случая с использованием метода Чебышева получена зависимость удаляемого припуска Z от продолжительности обкатывания. На рисунках 6 и 7 приведены результаты исследования, выполненные по методике, изложенной выше.

$$Z(t) = 1,04 + 0,02t; \quad \begin{cases} 1; & 5 \leq t \leq 15 \text{сек}; & P = 120 \text{Н} \\ 0; & \text{остальное} \end{cases} \quad (9)$$

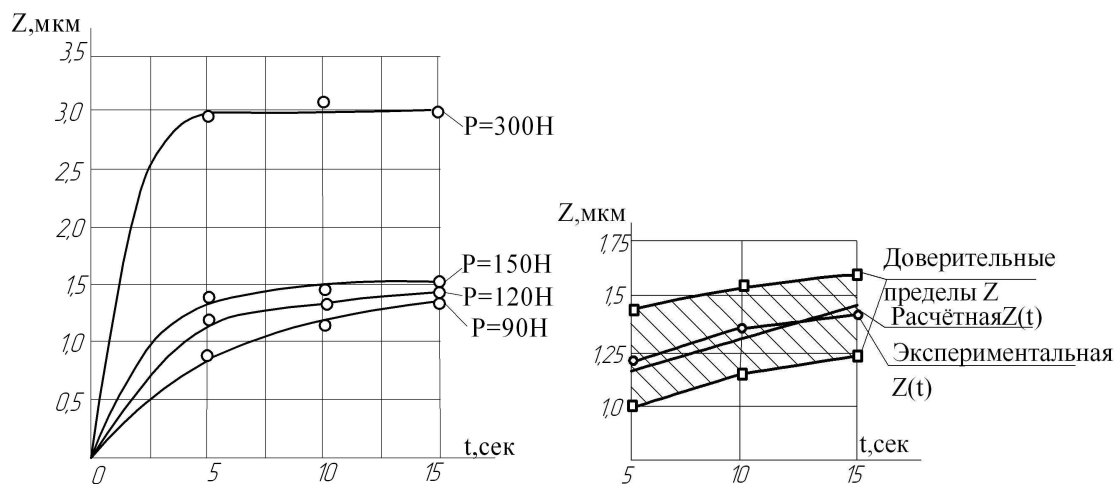


Рисунок 6 – Сравнительные данные экспериментальных и расчетных значений удаляемого припуска при обкатке от продолжительности процесса

$$Z(P) = 0,04 + 0,011P ; \begin{cases} 1; & 90 \leq P \leq 300H; \\ 0; & \text{остальное} \end{cases} \quad t = 10 \text{сек} \quad (10)$$

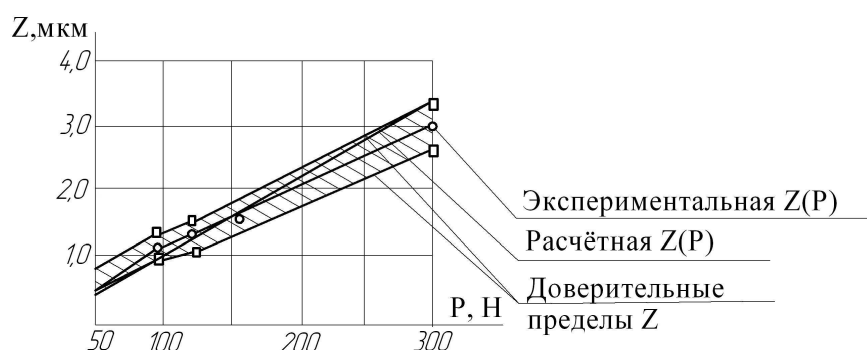


Рисунок 7 – Сравнительные данные экспериментальных и рассчитанных по зависимости (10) значений удаляемого припуска Z при обкатывании с различными усилиями P

Зависимость $Z(P)$ рассчитана для случая, когда максимальная сила прижатия роликов при обкатывании не превышает 300...400 Н.

В качестве выводов можно отметить следующее:

1. Исследование методов доводки поступающих на сборку деталей прецизионных пар малых диаметров показало, что в качестве доводочных операций следует рекомендовать обкатку роликами.
2. Установлено что поверхности деталей под доводку обкатыванием, полученные чистовым точением, предпочтительнее шлифованных.
3. Получены аналитические выражения зависимости величины удаляемого припуска от режимов доводки.

Библиографический список

1. Кремень З.И. Абразивная доводка / З.И. Кремень, А.И. Павлючук. — М.: Машиностроение, 1967. — 424 с.
2. Маталин А.А. Новые направления развития технологии чистовой обработки / А.А. Маталин. — Л.: Машиностроение, 1985. — 496 с.
3. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д.Д. Папшев. — М.: Машиностроение, 1968. — 132 с.
4. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С. Солонин. — М.: Машиностроение, 1972. — 215 с.

Поступила в редакцию 15.04.2010 г.