

УДК 621.941

*А.А. ОРГИЯН*, д-р техн. наук, *А.В. БАЛАНЮК*,  
*АЛБАКУШ АИМЕН*, Одесса, Украина

### **РАСЧЕТЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТОНКОГО РАСТАЧИВАНИЯ ГЛАДКИХ И СТУПЕНЧАТЫХ ОТВЕРСТИЙ.**

В статті на основі розвитку теорії точності запропонований розрахунок статичних і динамічних похибок форми поперечного перерізу отвору при тонкому розточуванні. Значення цих похибок визначаються за номограмами, складеними для сталі, чавуну, алюмінію та бронзи. Запропоновано розрахункову модель для визначення динамічних похибок на основі технологічної динаміки.

В статье на основе развития теории точности предложен расчет статических и динамических погрешностей формы поперечного сечения отверстия при тонком растачивании. Значения этих погрешностей определяются по номограммам, составленным для стали, чугуна, алюминия и бронзы. Предложена расчетная модель для определения динамических погрешностей на основе технологической динамики.

In the article on the basis of the development of the theory of the accuracy of the proposed calculation of static and dynamic errors of the cross-sectional shape of the hole fine boring. The values of these errors are defined by nomograms compiled for steel, iron, aluminum and bronze. The proposed computational model for determining dynamic errors on the basis of technological dynamics.

Определение погрешностей при разных видах обработки, является актуальным направлением в изучении точности. Особенно актуальна задача повышения точности тонкого растачивания - финишной операции обработки прецизионных отверстий. Вероятно – статический метод исследования точности подробно изучен в работах [1, 2] и др. На основе методов теории вероятностей и математической статистики для отдельных видов обработки на металлорежущих станках были определены нормы "экономической точности".

Другим направлением исследований точности на основе изучения закономерностей явлений, в результате которых возникают погрешности обработки, явилось развитие расчетно-аналитического метода [3].

На практике часто используют сочетание расчетно-аналитического и вероятностно-статистического методов.

При тонком растачивании отверстий на отделочно – расточных станках возможны такие источники погрешностей [4]:

- 1) Отклонение от прямолинейности движения стола станка;
- 2) Деформации и упругие смещения элементов станка, шпинделя, борштанги, обрабатываемой заготовки с приспособлением от усилий закрепления, сил резания и трения в работающих подсистемах станка;
- 3) Размерный износ резцов;
- 4) Неравномерность жесткости системы УДИС;
- 5) Отклонения от соосности и параллельности осей шпинделей расточных головок, установленных на противоположных мостиках;
- 6) Биение шпинделя расточной головки;
- 7) Погрешность положения и формы отверстия в заготовке, а также погрешности установки заготовки;
- 8) Колебания в системе УДИС.

Оценивая влияние колебательных взаимодействий в замкнутой динамической системе станка на точность обработки, исследователи выделяют статическую и динамическую составляющие погрешностей обработки. Статические погрешности при тонком растачивании имеют частоту меньше низшей собственной частоты системы и, как правило кратную частоте вращения шпинделя. Наиболее часто статические погрешности формируют овальность отверстия. Изучая влияние вибраций на точность, следует отметить, что анализ круглограмм расточенных отверстий показывает, что колебания могут быть фактором,

преимущественно определяющим погрешности формы поперечного сечения.

В работе [5] разработана методика расчета следующих частных погрешностей:

$\Pi_e$  – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная смещением оси отверстия в заготовке относительно оси шпинделя (рис. 1);

$\Pi_o$  – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная овальностью отверстия в заготовке;

$\Pi_k$  – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная неравномерностью радиальной податливости у резца по углу поворота шпинделя;

$\Delta R_D$  – отклонения от круглости поперечного сечения обработанного отверстия, вызванные колебаниями.

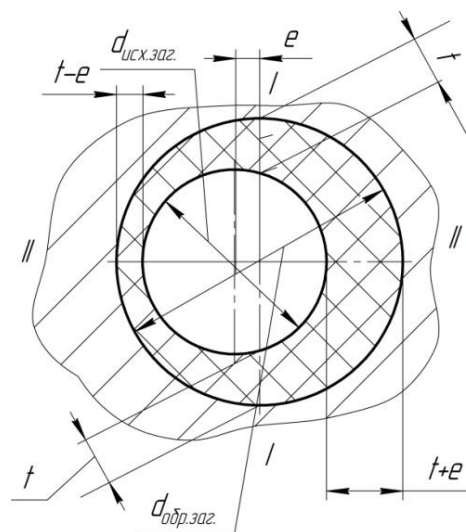


Рисунок 1 – Схема образования неравномерности припуска от смещения оси заготовки.

Первые три из названных погрешностей, возникающие под действием возмущений, имеющих периодичность вращения шпинделя, определяются статическим расчетом. Эти погрешности можно считать независимыми, а кривые их распределения – близкими к нормальным.

Поэтому суммарная статическая погрешность  $\Pi_c$  определяется выражением:

$$\Pi_c = t \sqrt{\frac{1}{9} \cdot \Pi_e^2 + \frac{1}{9} \cdot \Pi_o^2 + \frac{1}{9} \cdot \Pi_k^2}, \quad (1)$$

где  $t$  – коэффициент, определяющий процент получения брака при обработке. Для тонкого растачивания точных отверстий следует обеспечить достаточно низкий процент риска 0,27 %, а для этого следует выбрать  $t = 3$ .

Определение отклонений от круглости поперечного сечения, вызванных статическими возмущениями  $\Delta R_c$ , сводится к переходу от диаметральной меры погрешности к радиальной:

$$\Delta R_c = 0,5 \Pi_c = 0,5 \sqrt{\Pi_e^2 + \Pi_o^2 + \Pi_k^2}. \quad (2)$$

Отклонения от круглости поперечного сечения, вызванные колебаниями, определяются амплитудой колебаний "А":

$$\Delta R_d = 2A, \quad (3)$$

так как при колебаниях радиус вписанной окружности уменьшается на А, а описанной – возрастает на "А": Сумма статических и динамических составляющих круглости определяет полное отклонение от круглости:

$$\Delta R = \Delta R_c + \Delta R_d. \quad (4)$$

Значения радиальной силы резания  $P_y$ , необходимые для расчета погрешностей, могут быть найдены по эмпирическим формулам, полученным для тонкого растачивания разных материалов. Сила  $P_y$  является степенной функцией глубины резания  $t$  и подачи  $s$ :

$$P_y = C_{py} \cdot t^{X_{py}} \cdot s^{Y_{py}}, \quad (5)$$

Значения величин, входящих в (1), приведены в таблице для разных обрабатываемых материалов.

Таблица

	Сталь	Чугун $H_B=170$	Бронза	Алюминиевый сплав
$C_{py}$ (кг)	48	65	28	102
$X_{py}$	0,83	0,96	0,8	0,93
$Y_{py}$	0,44	0,77	0,53	0,8

Погрешность диаметрального размера обработанного отверстия, вызванную несовпадением осей отверстия в заготовке с осью шпинделя (неточностью установки заготовки в виде эксцентриситета) можно рассчитать по разности между отжимами борштанги в двух диаметральных плоскостях (рис. 1):

$$P_e = 2 \cdot K \cdot P_y(t) - K [P_y(t+e) + P_y(t-e)]. \quad (6)$$

Здесь  $K$  – радиальная податливость системы у резца;  
 $e$  – эксцентриситет.

Погрешность диаметра обработанного отверстия, вызванная отклонениями от круглости (например, в виде овальности) отверстия в заготовке, может быть рассчитана как удвоенная разность между соответствующими отжимами борштанги в направлениях осей овала (рис. 2):

$$P_o = 2 \cdot K [P_y(t) - P_y(t - H_o)], \quad (7)$$

где  $H_o$  – наибольшая разность радиусов отверстия в заготовке (овальность).

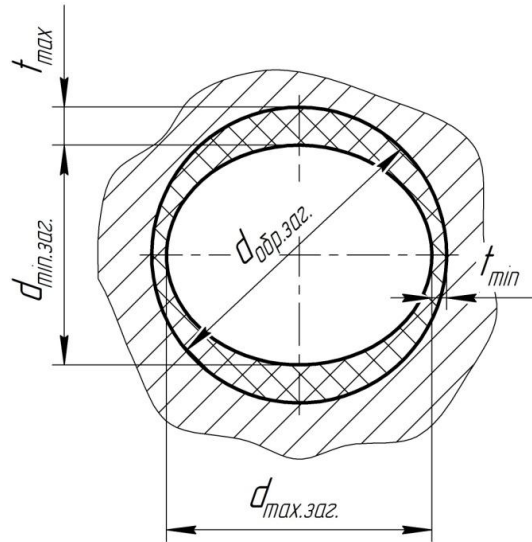


Рисунок 2 – Схема образования неравномерности припуска от предварительной овальности заготовки

Погрешность диаметра обработанного отверстия, вызванная неравномерностью радиальной податливости у резца по углу поворота шпинделя, может быть рассчитана как удвоенная разность между наибольшим и наименьшим отжимами борштанги в соответствующих диаметральных плоскостях:

$$П_K = 2(K_{max} P_y - K_{min} P_y). \quad (8)$$

Сопоставление формул (6) – (8) после преобразований показывает, что они имеют однообразную структуру – произведение податливости, силы резания и некоторой функции  $f_i$  ( $i = e, o, K$ ), вид которой определяется соответствующим источником статической погрешности

$$f_e\left(\frac{e}{t}\right) = 2 - \left(1 + \frac{e}{t}\right)^{X_{py}} - \left(1 - \frac{e}{t}\right)^{X_{py}},$$

$$f_o = 2 \left[ 1 - \left(1 - \frac{H_o}{t}\right) \right]^{X_{py}}, \quad (9)$$

$$f_K = \frac{2\Delta K}{K},$$

Следовательно соотношения 2, 3 и 4 могут быть представлены так:

$$P_i = K \cdot C_{py} \cdot t^{X_{py}} \cdot s^{Y_{py}} \cdot f_i. \quad (10)$$

Величины погрешностей, определяемых формулой (10), удобно определять по номограммам, составленными для стали, чугуна, алюминия. На рис. 3 приведена номограмма для чугуна. Для определения погрешностей следует во всех случаях назначить режимы резания  $(s, t)$ , определить податливость системы шпиндель - борштанга [7], а также значения  $e/t$ ,  $2\Delta K/K$  и  $H_0/t$ . Соединяя на номограмме отрезками прямых значения  $S$  и  $K$ , а также значения  $t$  с параметрами  $2\Delta K/K$ , или  $H_0/t$  получаем точки на промежуточных осях I и II. Соединяя соответствующие точки на осях I и II отрезками, находим точки пересечения последних с осью  $P_i$ , определяющей погрешность растачивания. Правила (ключи) пользования номограммой приведены на рис. 3.

Установлено, что 1/5 всех отверстий, обрабатываемых на ОРС ступенчатые. Для повышения производительности и точности в этих случаях применяют ступенчатые борштанги, оснащенные виброгасителями при больших вылетах. Для расчета погрешностей, возникающих в условиях тонкого растачивания многолезцовыми борштангами, сохраняется общий подход к определению частных погрешностей и методике их суммирования, приведенный ранее. Отличительной особенностью расчетов при многолезцовой обработке является учет взаимного влияния возмущений, возникающих на каждой из обрабатываемых ступеней отверстия.

Расчетная схема подсистемы шпиндель-борштанга приведена на рис. 4 [6].

Статические характеристики шпиндельного узла, оснащенного ступенчатой борштангой, следует принять такими же, как и в случае борштанги постоянного диаметра. Коэффициенты влияния  $\delta_{iK}$  для ступенчатой борштанги рассчитаны для ступеней, в которых установлены резцы. Исходными данными для расчета являются параметры шпиндельного узла  $(C, EI_0, a_0, m_1)$  и параметры борштанги  $(l_i, EI_i, \rho$  - плотность материала).

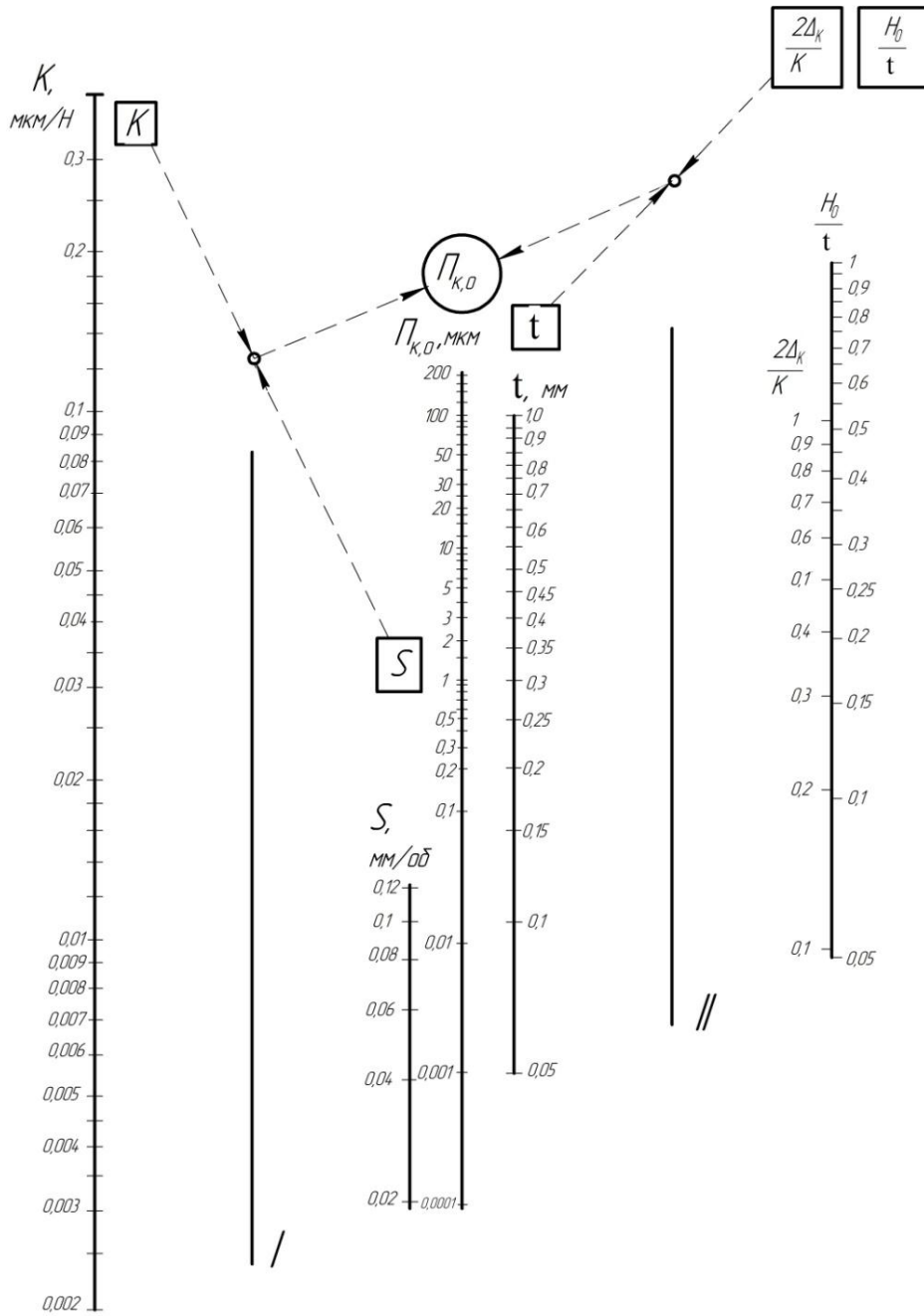


Рисунок 3 – Определение статических погрешностей при растачивании образцов (чугун) по номограмме

○ – значения частных погрешностей  $\Pi_i$ ;

$K$  – податливость упругой системы;

$S$  – подача на один оборот;  $t$  – глубина резания.



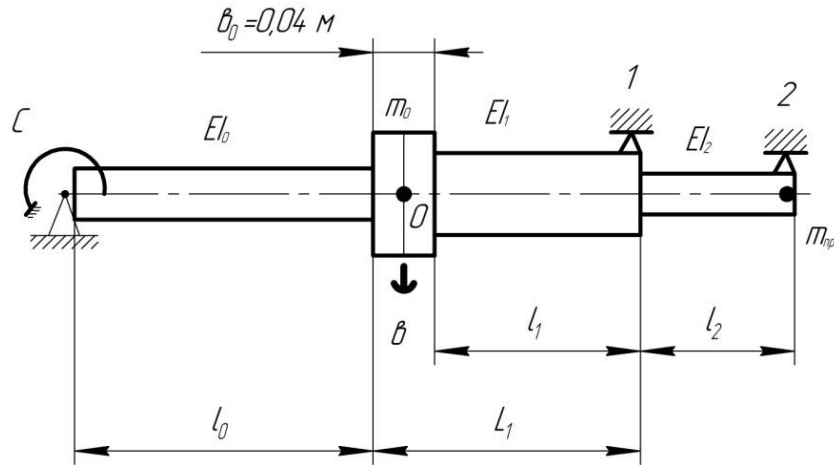


Рисунок 4 – Схема расчетной модели

Кроме того в расчет вводятся характеристики процесса резания и данные о возмущениях, действующих на замкнутую динамическую систему станка. Инерционная характеристика инструмента ( $m$ ) во всех вариантах расчета определяется как масса борштанги, приведенная к сечению наиболее удаленного от фланца работающего резца. Вылеты ступеней борштанги и жесткости сечений обозначены соответственно  $l_1, l_2$  и  $EI_1, EI_2$ . Угловая жесткость опоры равна "С". Цифрами 0, 1 и 2 обозначены номера сечений у фланца и в местах расположения резцов. Фланец принят недеформируемым.

Коэффициенты влияния  $\delta_{ik}$  ( $i$  – номер сечения, в котором определяется перемещение,  $k$  – номер сечения, в котором приложена единичная сила), определяем как сумму перемещений:  $\delta_{ik \text{ угл.}}$  – вызванного углом поворота балки относительно опоры, и  $\delta_{ik \text{ лин.}}$  – вызванного собственной деформацией балки. Перемещение  $\delta_{ik \text{ угл.}}$  рассчитываем по формуле:

$$\delta_{ik \text{ угл.}} = \frac{l_i \cdot l_k}{C},$$

где  $l_i$  – расстояние от опоры С до  $i$ -того сечения;

$l_k$  – расстояние от опоры С до  $k$ -того сечения.

Перемещение  $\delta_{iK}^{лин}$  находим по формулам, составленным по способу Верещагина.

Приведенная выше методика расчета статических погрешностей при однорезцовой обработке основана на суммировании частных погрешностей, вызванных смещением осей заготовки и шпинделя ( $P_e$ ), овальностью отверстия в заготовке ( $P_o$ ) и неравномерностью податливости шпиндельного узла по углу поворота ( $P_K$ ). Каждая из этих погрешностей, рассчитываемая как произведение податливости у резца ( $K$ ) на известную функцию, представляет собой некоторое перемещение борштанги в сечении резца (9).

При многорезцовой обработке будем считать, что каждый  $j$ -тый из  $n$  работающих резцов вносит собственные погрешности  $P_{ej}$ ,  $P_{oj}$  и  $P_{Kj}$ , величины которых находятся по номограммам (рис. 3) для однорезцовой обработки. Неравномерность податливости шпинделя по углу его поворота, характеризуемая, например, эллипсом, будет приводить к погрешностям на каждой из ступеней в виде эллипсов, оси которых будут лежать в одной плоскости. При этом полная погрешность обработки на каждой из ступеней (или иначе, для каждого номера резца), вызванная этим источником погрешности, найдется как сумма погрешностей: собственной и дополнительной от всех работающих резцов.

Дополнительные погрешности можно найти через коэффициенты влияния путем деления на собственную податливость у соответствующего резца ( $K_j = \delta_{jj}$ ) и умножения на соответствующий коэффициент влияния. Например, при двухрезцовой обработке погрешность у второго резца равна:

$$P_{K1} \cdot \frac{\delta_{12}}{\delta_{11}} + P_{K2} \cdot \frac{\delta_{22}}{\delta_{22}}.$$

В обобщенном виде для  $i$ -того резца погрешность от неравномерной податливости равна:

$$\sum_{j=1}^n P_{Kj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}}.$$

Можно допустить, что и остальные статические источники погрешностей вызывают искажения формы сечения отверстия, оси эллипсов которых имеют одинаковую ориентацию на всех ступенях. Тогда полная погрешность  $i$ -того резца от эксцентричности установки будет равна:

$$\sum_{j=1}^n P_{ej} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}}.$$

От предварительной овальности полная погрешность будет равна:

$$\sum_{j=1}^n P_{oj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}}.$$

Полное отклонение от круглости формы поперечного сечения, определяемое для  $i$ -того резца влиянием статических погрешностей, может быть найдено по аналогии с (2) как:

$$\Delta R_{ci} = 0,5 \sqrt{\left[ \sum_{j=1}^n P_{ej} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}} \right]^2 + \left[ \sum_{j=1}^n P_{Kj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}} \right]^2 + \left[ \sum_{j=1}^n P_{oj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}} \right]^2}. \quad (11)$$

Динамические погрешности при тонком растачивании определяются расчетом вынужденных колебаний [6].

На рис. 5 приведены результаты расчетов и экспериментов, характеризующие зависимость  $P_o$  от соотношения длин ступеней борштанги.

Разработанная расчетная методика представляет собой развитие общей теории точности обработки, созданной работами ученых - технологов и вошедшей в монографии и современные справочные издания Маталина А.А., Косиловой А.Г., и др.. Предложенная методика уточняет и развивает общие представления и способы для определения точности формы поперечного сечения отверстия, обработанного на отделочно-расточном станке. Полученные результаты относятся к определению погрешностей обработки, порождаемых статическими и динамическими деформациями шпиндельного узла с борштангой в условиях высокой жесткости обрабатываемой заготовки и приспособления, в котором она установлена.

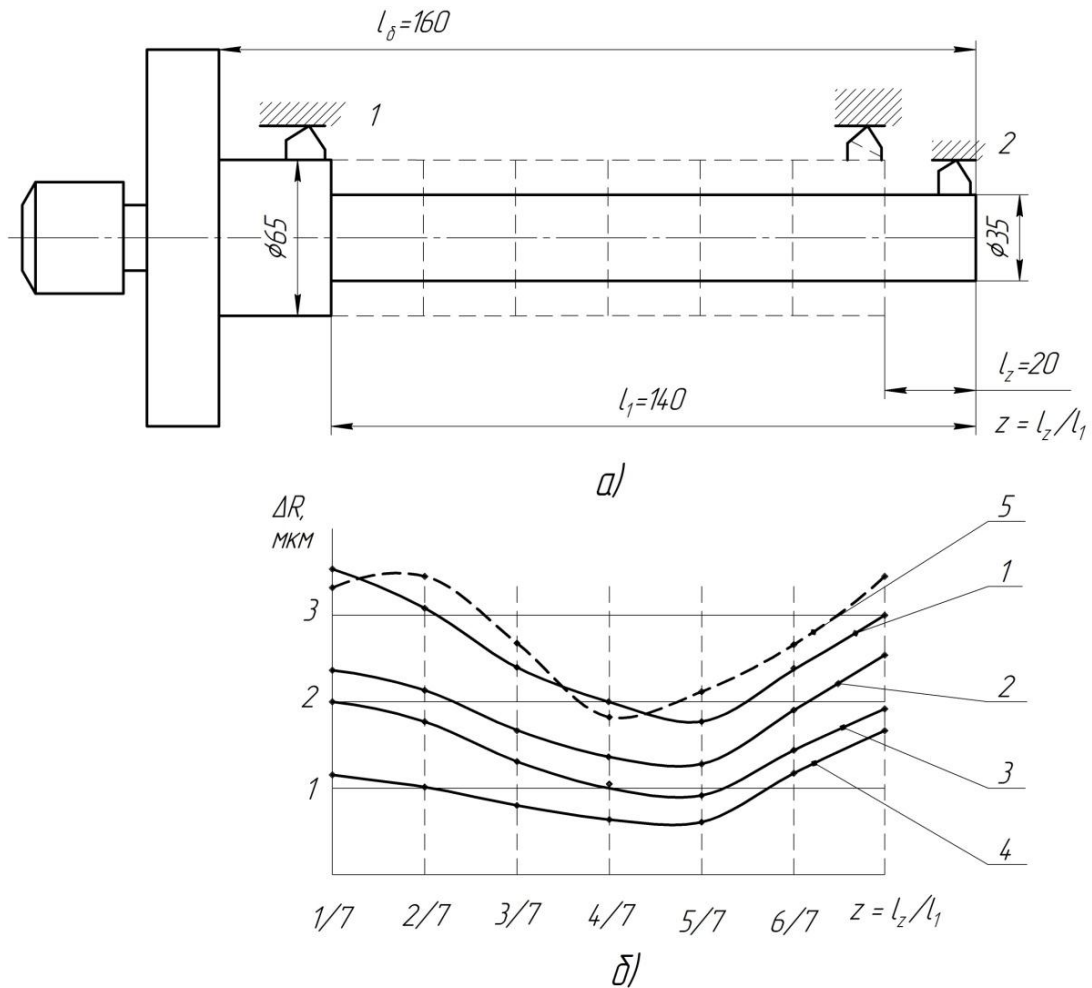


Рисунок 5 – Зависимость отклонения от круглости отверстий от соотношения длин ступеней борштанги:

а) эскиз борштанги;

б) измерения на  $d_0 = 35$ :

сталь 45,  $v = 180$  м/мин;  $s = 0,05$  мм/об;

$t = 0,3$  мм: 1 – работают резцы 1 и 2;

2 – работает резец 2; 5 – эксперимент

$t = 0,1$  мм: 3 – работают резцы 1 и 2; 4 – работает резец 2

## Выводы:

1. Предложена расчетная методика определения статических и динамических погрешностей формы поперечного сечения отверстия при тонком растачивании.
2. Определение величины погрешностей ведется по номограммам, составленным для стали, чугуна, бронзы и алюминия.
3. Приведены соотношения для определения частных погрешностей при растачивании гладких и ступенчатых отверстий.
4. Установлено, что при обработке отверстий за один проход на точность сильно влияет овальность отверстия в заготовке. Для борштанг диаметром  $d_1$  от 40 до 80 мм при относительной длине инструмента ( $l_B / d_B$ ) от 1 до 4 и глубине резания от 0,05 до 0,4 мм можно принять усредненное соотношение между частными погрешностями  $P_K : P_O : P_e = 10 : 100 : 5$ . Однако, после второго прохода это соотношение изменяется из – за значительного уменьшения  $P_O$ , и для средних значений выполняется соотношение  $P_K : P_O : P_e = 100 : 20 : 1$ , то есть определяющим точность фактором становится переменность податливости.

**Список использованных источников:** 1. Маталин А. А. Технология машиностроения: Учебник. 2-е изд., испр. СПб.: Издательство «Лань», 2008.— 512 с: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978-5-8114-0771-2. 4. 2. Корсаков В.С. (ред.) Основы технологии машиностроения. Учебник для вузов. - Кован В. М., Корсаков В. С., Косилова А. Г. под ред. Корсакова В. С. - изд. 3-е, доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1977. - 416 с. 4. 3. Обработка металлов резанием: Справочник технолога [Текст] А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общ. ред. А.А. Панова. 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.: ил. – ISBN 5-94275-049-1. 4. П.А. Лінчевський та ін.. Обробка деталей на обробно-розточувальних верстатах / П.А. Лінчевський, Т.Г. Джугурян, О.А. Оргіян, за заг. ред.. П.А. Лінчевського. – К.: Техніка, 2000. – 300с. ISBN 966-575-048-8. 5. А.А. Оргіян, А.В. Баланюк "Технологическая динамика тонкого растачивания двухступенчатых отверстий". Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць. –

Вип. 3(8). – О.: Наука і техніка, 2015. с. 213 – 223. 6. А.В. Баланюк "Колебания двухступенчатых консольных борштанг при тонком растачивании". Збірник наукових праць (галузеve машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. 2014р. Стр. 131 – 139. 7. Нормативы режимов резания и геометрия резцов для тонкого растачивания. Обработка на отделочно-расточных станках. Крупносерийное и массовое производство. НИИмаш., Москва 1979. – 93с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Matalin A. A. Tehnologija mashinostroenija: Uchebnik. 2-e izd., ispr. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2008.— 512 s: il.— (Uchebniki dlja vuzov. Special'naja literatura). ISBN 978-5-8114-0771-2. 4. 2. Korsakov V.S. (red.) Osnovy tehnologii mashinostroenija. Uchebnik dlja vuzov. - Kovan V. M., Korsakov V. S., Kosilova A. G. pod red. Korsakova V. S. - izd. 3-e, dop. i pererab. M.: Mashinostroenie, 1977. - 416 s. 4. 3. Obrabotka metallov rezaniem: Spravochnik tehnologa [Tekst] A.A. Panov, V.V. Anikin, N.G. Bojm i dr.; Pod obshh. red. A.A. Panova. 2-e izd., pererab. I dop. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 784 s.: il. – ISBN 5-94275-049-1. 4. P.A. Linchevs'kij ta in.. Obrobka detalej na obrobno-roztochival'nih verstatah / P.A. Linchevs'kij, T.G. Dzhugurjan, O.A. Orgijan, za zag. red.. P.A. Linchevs'kogo. – K.: Tehnika, 2000. – 300s. ISBN 966-575-048-8.5. A.A. Orgijan, A.V. Balanjuk "Tehnologicheskaja dinamika tonkogo rastachivaniija dvuhstupenchatyh otverstij". Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi: zbirnik naukovih prac'. – Vip. 3(8). – O.: Nauka i tehnika, 2015. s. 213 – 223. 6. A.V. Balanjuk "Kolebanija druhstupenchatyh konsol'nyh borshtang pri tonkom rastachivanii". Zbirnik naukovih prac' (galuzeve mashinobuduvannja, budivnictvo) / Poltavs'kij nacional'nij tehničnij universitet imeni Jurija Kondratjuka. 2014r. Str. 131 – 139. 7. Normativy rezhimov rezaniija i geometriija rezcov dlja tonkogo rastachivaniija. Obrabotka na otdelocno-rastocnyh stankah. Krupnoseriijnoe i massovoe proizvodstvo. NIImash., Moskva 1979. – 93s.