

Part 2. IMPROVEMENT OF ACCURACY AND ECONOMY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

2.1. DEVELOPMENT OF THE ACCURACY FOR FINE BORING

Повышение точности в машиностроении имеет большое технико-экономическое значение, поскольку точность изготовления и сборки определяющим образом влияет на качество машин, их надежность и долговечность. Заметное место в машиностроении занимает задача повышения точности окончательной обработки отверстий¹ – операции, для которой в серийном производстве весьма эффективно применение отделочно-расточных станков (ОРС).

Влияние на точность общих компоновочных решений ОРС изучалось П.А. Линчевским² и др, которые выработали рекомендации по конструкции несущих систем станков, гидропривода и др. Реализация этих рекомендаций привела к повышению точности станков³ и выдвинула на первый план проблемы качества шпиндельных узлов. Влияние на точность геометрии и материала инструмента⁴, а также режимов обработки интенсивно изучалось в работах А.А. Маталина⁵, А.Г. Суслова⁶ и их сотрудников. Использования связей показателей динамического качества и точности ОРС, обеспечивающих разработку норм на вибрации холостого хода, дисбаланс и применение алмазных резцов, а также создание контрольной аппаратуры выполнялись под руководством В.А. Кудинова⁷ и др.

Отмечая положительные результаты названных исследований, следует обратить внимание на отсутствие единой методики расчета ожидаемой погрешности формы отверстия, обработанного на ОРС. Таким образом, проектируя отделочно-расточной станок, конструктор лишен возможности обоснованного выбора ряда важных конструктивных параметров. Хотя достаточно полно установлены достижимые значения точностных характеристик ОРС в условиях стандартных испытаний (обработка короткой борштангой гладкой цилиндрической поверхности жесткого образца, закрепленного в весьма жестком приспособлении), влияние отступлений от этих условий на точность остается малоизученным. Даже при обработке простых цилиндрических отверстий полно не установлено влияние размеров борштанги на погрешности⁸. Тем более трудно прогнозировать точность часто встречающейся многорезцовой обработки ступенчатых отверстий⁹. Недостаточное изучение количественных показателей взаимодействия одновременно работающих шпинделей, а также упругих подсистем инструмента и приспособления делают задачу установления влияния этих факторов на точность неопределенной.

¹ Брижан Т.М. Условия повышения точности обработки отверстий / Т.М. Брижан // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. тр. 4-ой междунаро. науч.-практ. конф. В 3-х томах, Том 1. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 104-109.

² Линчевський П.А. та ін..Обробка деталей на обробно-розточувальних верстатах / П.А. Линчевський, Т.Г. Джугуриян, О.А. Оргіян, за заг. ред.. П.А. Линчевського. – К.: Техніка, 2000. – 300с. ISBN 966-575-048-8

³ Кочанов Ю. С. Алмазно-расточные станки. Источники погрешностей при тонком растачивании. / Ю.С. Кочанов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. – Орел – 2014. – № 6(308). – С. 82 – 85.

⁴ Бромберг Б.М., Дашевский Т.Б., Ламдон Э.А., Ломакин В.К. Алмазно – расточные станки. – М.: Машиностроение, 1965. – 241 с.

⁵ Маталин А.А. Технология машиностроения: учебное пособие. – 3-е изд. – СПб.:Лань, 2010. – 512 с.

⁶ Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

⁷ Кудинов В.А. Динамика станков. – Машиностроение, 1967. – 360 с.

⁸ A. Bansal and M. Law. A Receptance Coupling Approach to Optimally Tune and Place Absorbers on Boring Bars for Chatter Suppression. 8th CERJP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018)- P 167–170.

⁹ Knut Sorby, Dan Ostling. Precision turning with instrumented vibration-damped boring bars. 8 th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018). P 666–669.

Точные отверстия обрабатывают при больших значениях запаса устойчивости замкнутой динамической системы станка и поэтому можно полагать, что автоколебания отсутствуют.

Целью работы является разработка методики определения погрешностей обработки, порождаемых статическими и динамическими деформациями шпиндельного узла с борштангой в условиях растачивания гладких и ступенчатых отверстий.

Объектом исследования является операция тонкого растачивания ступенчатых отверстий на ОРС.

Предмет исследования – динамика и точность тонкого растачивания ступенчатых отверстий.

Анализ точности ОРС свидетельствует, что отклонения от круглости ΔR поперечного сечения обработанного отверстия можно определить суммированием исходной погрешности ΔR_u , полученной при испытаниях станка в нормализованных условиях (обработка короткой жесткой борштангой сплошного отверстия в жестком образце), и погрешности $\Delta R_{упр.}$, определяемой упругими деформациями, которые образуются при повышении податливости по сравнению со стандартными условиями испытаний.

Исходная погрешность ΔR_u исследовалась при испытаниях шпиндельных узлов, которые устанавливались посередине моста ОРС и оснащались жесткой борштангой ($d_1 = 27$ мм, $l_1 = 36$ мм). В образцах из стали и бронзы в жестком приспособлении, растачивались отверстия диаметром 34 мм при $n = 3000$ мин⁻¹, $t = 0,1$ мм, $s = 0,03$ мм/об.

С ростом податливости K_u подсистемы инструмента погрешности обработки возрастают, а при $K_u = 0,1..0,15$ мкм/Н погрешности $\Delta R_{упр.}$ становятся сопоставимыми по величине с ΔR_u .

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. Факторами, определяющими динамические погрешности, являются колебания станка. 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 Оргияна А.А.¹⁰ разработана методика расчета следующих частных статических погрешностей формы поперечного сечения:

P_K – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная анизотропией $2\Delta K$ радиальной податливости системы у резца:

$$P_K = 2(K_{\max} P_y - K_{\min} P_y), \quad (1)$$

где P_y – радиальная сила резания,

K_{\min}, K_{\max} – минимальная и максимальная податливость шпинделя по углу поворота;

P_o – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная овальностью отверстия в заготовке:

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

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

P_e – диаметральная погрешность формы обработанного отверстия, вызванная смещением оси отверстия в заготовке относительно оси шпинделя:

¹⁰ Оргиян А.А. Расчеты погрешностей тонкого растачивания гладких и ступенчатых отверстий. / Оргиян А.А., Баланик А.В., Албакуш Аимен / Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 10 / – Харків : НТУ «ХП», 2015. – 343 с. – Укр., рос., англ. мовами. Стр. 235 – 249.

$$P_e = 2 \cdot K \cdot P_y(t) - K[P_y(t+e) + P_y(t-e)], \quad (3)$$

где K – радиальная податливость системы у резца;

e – эксцентриситет.

Погрешности Π_o и Π_e формируются в условиях переменной толщины среза. Оценки влияния неравномерности припуска на отклонения от круглости отверстия приводят к значениям ΔR в пределах 0,01 – 0,2 мкм. Экспериментальные данные дают величины того же порядка.

Полное статическое отклонение от круглости выражается через частные погрешности $\Delta R_{cm} = 0,5 \cdot \sqrt{\Pi_e^2 + \Pi_o^2 + \Pi_k^2}$. При этом предполагается, что все частные погрешности независимы и распределены по нормальному закону. На основании приведенных выше формул нами выполнен аналитический расчет погрешностей на ПК.

Исходными данными для расчета является:

- податливость системы у резца;
- обрабатываемый материал;
- режим обработки (t, s);
- овальность отверстия в заготовке ($2H_0$);
- смещение оси отверстия в заготовке относительно оси шпинделя (e);
- разность между минимальной и максимальной податливостями ($2\Delta K$) при вращении шпинделя;
- упругие характеристики шпиндельного узла;
- размеры борштанги;
- спектры колебаний в зависимости от скорости холостого вращения шпинделя, содержащие данные о кинематической погрешности вращения шпинделя и динамических возмущениях.

Погрешность от анизотропии радиальной податливости у резца при повороте шпинделя после преобразований формулы 1 принимает вид:

$$\Pi_k = KP_y \frac{2\Delta K}{K}, \quad (4)$$

где $2\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$.

После преобразования формула для определения Π_o (2) представлена в виде:

$$\Pi_o = 2KP_y \left[1 - \left(1 - \frac{H_0}{t} \right)^{X_{py}} \right]. \quad (5)$$

Погрешность Π_e , определяемая неточностью установки заготовки, рассчитывается по разности между отжимами борштанги в двух диаметральных плоскостях; после преобразования формула 3 принимает вид:

$$\Pi_e = KP_y \left[2 - \left(1 + \frac{e}{t} \right)^{X_{py}} - \left(1 - \frac{e}{t} \right)^{X_{py}} \right]. \quad (6)$$

Представляя $P_y = C_{py} \cdot t^{X_{py}} \cdot s^{Y_{py}}$, где коэффициент C_{py} и показатели степени X_{py} и Y_{py} зависят от обрабатываемого материала и сравнивая формулы 4, 5 и 6 представляем частные погрешности в обобщенном виде:

$$\Pi_j = C_{py} \cdot t^{X_{py}} \cdot s^{Y_{py}} \cdot \lambda_j, \quad (7)$$

где $\lambda_j = K \cdot \varepsilon_j$, где ε_j соответствует источнику статической погрешности:

$$\begin{aligned}\varepsilon_e &= 2 - (1 + e/t)^{X_{py}} - (1 - e/t)^{X_{py}}, \\ \varepsilon_o &= 2 \left[1 - (1 - H_o/t)^{X_{py}} \right], \\ \varepsilon_K &= 2\Delta K / K.\end{aligned}\tag{8}$$

Отклонения от круглости поперечного сечения, вызванные вынужденными колебаниями резца, установленного на борштанге, относительно обрабатываемой заготовки определяются амплитудой колебаний "А":

$$\Delta R_o = 2 \cdot A,$$

так как при колебаниях радиус вписанной окружности уменьшается на "А", а радиус описанной – возрастает на "А".

Полную упругую погрешность можно определить суммированием статической и динамической погрешностей:

$$\Delta R_{упр.} = \Delta R_{ст} + \Delta R_{дин.}.\tag{9}$$

Представляя отклонения от круглости обработанного отверстия в виде

$$\Delta R = \sqrt{\Delta R_u^2 + \Delta R_{упр.}^2}.$$

Уменьшение ΔR_u может быть достигнуто повышением точности подшипников и применением специальных методов сборки дуплексированных опор, например способом селективного подбора радиально-упорных подшипников в дуплекс – пары, содержащие подшипники с одинаковой величиной биения и взаимно перпендикулярной установкой больших осей овальностей. При этом динамическое качество шпиндельных узлов повышается, а погрешности формы расточенного отверстия уменьшаются до 0,5 – 0,6 мкм.

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 ступеней борштанги. Коэффициенты влияния 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 (Π_e), овальностью отверстия в заготовке (Π_o) и неравномерностью податливости шпиндельного узла по углу поворота (Π_K).

При многорезцовой обработке будем считать, что каждый j -тый из n работающих резцов вносит собственные погрешности Π_{ej} , Π_{oj} и Π_{Kj} , величины которых находятся по номограммам 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 двухступенчатого отверстия погрешность у второго резца (наиболее удаленного от фланца) 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:

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

Полное отклонение от круглости формы поперечного сечения, определяемое для i -того резца влиянием статических погрешностей, может быть найдено как:

$$\Delta R_{ci} = 0,5 \sqrt{\left[\sum_{j=1}^n P_{ej} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}} \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^n P_{Kj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}} \right]^2 + \left[\sum_{j=1}^n P_{oj} \cdot \frac{\delta_{ji}}{\delta_{jj}} \right]^2}. \quad (10)$$

Динамические погрешности при тонком растачивании определяются расчетом вынужденных колебаний.

Приведем результаты экспериментальных исследований по определению зависимостей характера и уровня колебаний от параметров упругой системы станка, процесса резания и характеристик обрабатываемой поверхности (материала, соотношения длин участков, диаметров ступеней и требуемого качества). Стенд для экспериментального исследования колебаний при растачивании двухступенчатыми борштангами был собран на базе отделочно-расточного станка с использованием специальных приспособлений. Конструктивный чертеж борштанги приведен на рисунке 1.

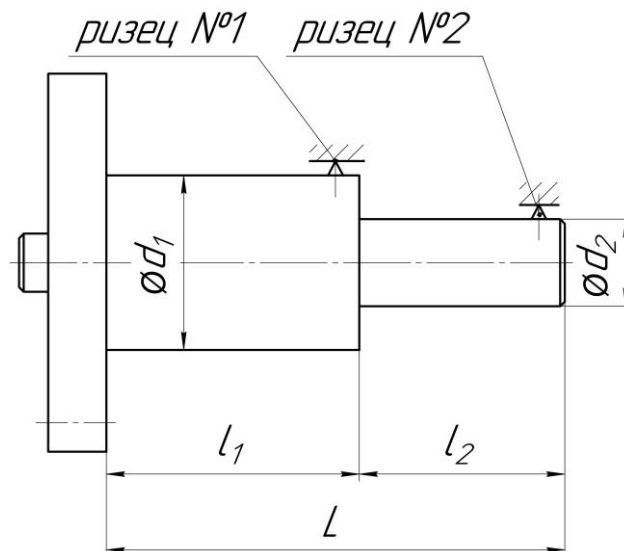


Рис. 1. Обозначение размеров двухступенчатых борштанг

Требования к стенду были определены задачами испытаний: изучить влияние характеристик ступенчатых поверхностей, режимов резания, а также параметров упругой системы на колебания и точность обработки. Изменения параметров упругой системы достигалось сменой борштанг различных размеров (изменялись соотношения длин ступеней, диаметров и обрабатываемых материалов). В экспериментах изменялись глубина и скорость резания. Бесступенчатое регулирование скорости резания достигалось использованием преобразователя частоты вращения двигателя (Danfoss VLT MicroDrive), выходной вал которого был связан ременной передачей со шпинделем. Стенд и измерительная аппаратура, для исследования колебаний приведены на рисунке 2.

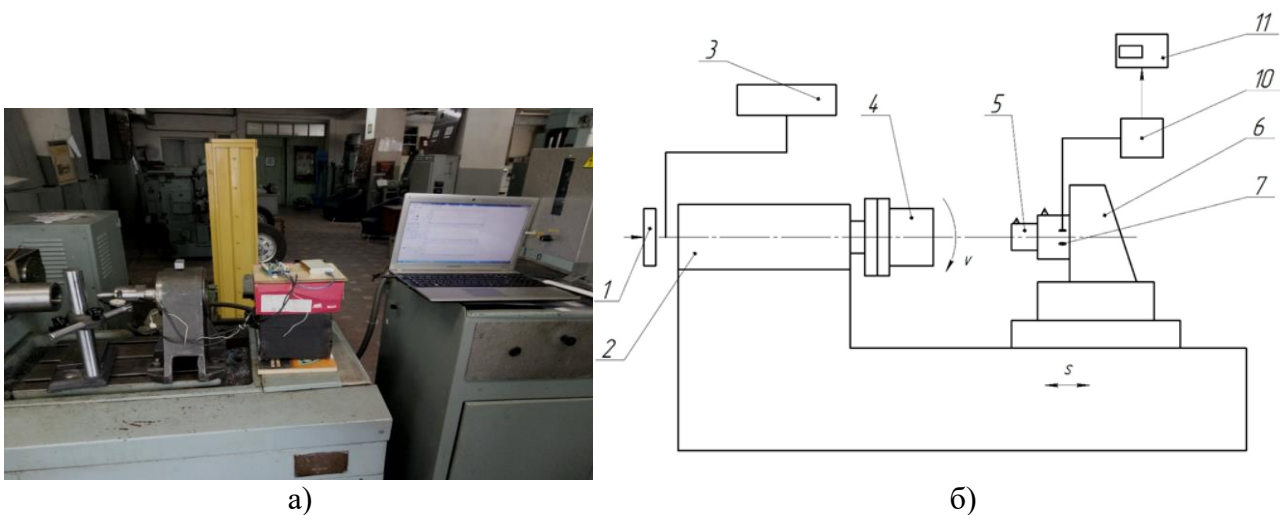
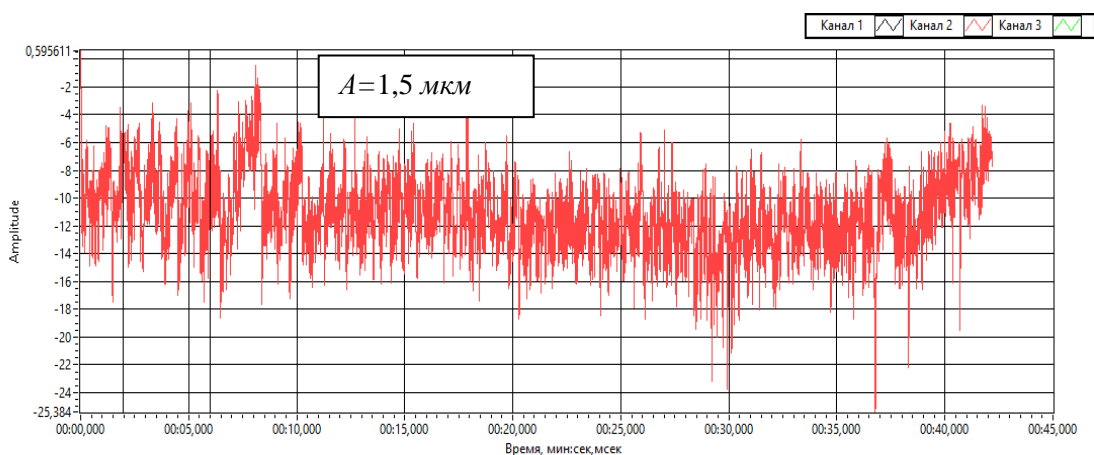


Рис. 2. Общий вид (а) и схема экспериментального стенда (б): 1 – тахометр; 2 – шпиндельная головка; 3 – преобразователь частоты; 4 – заготовка; 5 – борштанга; 6 – приспособление; 7 – тензорезисторы; 10 – устройство регистрации колебаний (УРК); 11 – персональный компьютер (ПК).

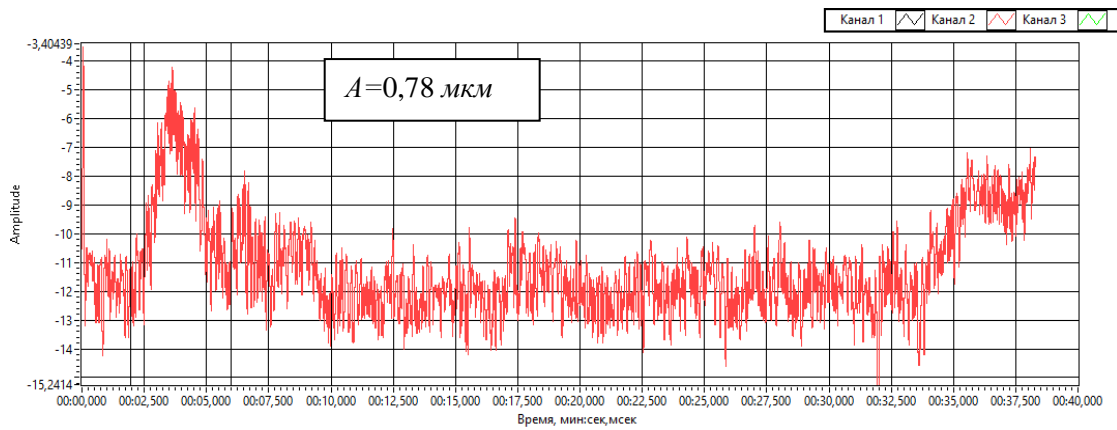
При проведении экспериментов обрабатываемая заготовка (4) устанавливалась на фланце шпинделя головки (2) ОРС. Консольная борштанга (5) крепилась в приспособлении (6), установленном на столе станка. На борштанге (5) вблизи заделки были наклеены две пары тензорезисторов (7). Тензорезисторы (7) и УРК (10) применялись для измерения изгибных колебаний борштанги в двух плоскостях. Две пары тензорезисторов были включены по дифференциальной схеме и обеспечивали надежное измерение процесса в диапазоне частот 0-7000 Гц. Указанный диапазон частот является вполне достаточным, так как характерные частоты изгибных колебаний борштанг находятся в диапазоне 400-3000 Гц.

Устройство для регистрации колебаний (10) состоит из 4-х тензометрических датчиков, которые соединены между собой по мостовой схеме, микроконтроллера Discovery STM32L0538-DISCO, тензоусилителя, microCD карты памяти и радио модуля Bluetooth.

На рис. 3 приведены осциллограммы колебаний при одновременной работе резцов с разным соотношениями длин ступеней борштанги.



а) $l_1=0,1$ м; $l_2=0,06$ м



б) $l_1=0,06$ м; $l_2=0,1$ м

Рис. 3. Работают одновременно два резца $f_{ep}=21$ Гц; $d_1=0,06$ м, $d_2=0,03$ м; $t_1=0,05$ мм; $t_2=0,05$ мм, обрабатываемый материал сталь 45.

Из анализа экспериментальных осциллограмм можно заключить, что при одновременной работе резцов на одной и той же борштанге при изменении длин ступеней при одинаковых режимах резания чередуются повышенные и пониженные уровни колебаний.

Таблица 1. Экспериментальные значения амплитуд вынужденных колебаний, шероховатостей и отклонения от круглости при одновременной работе резцов при изменении длин ступеней

Параметры борштанг	Длина ступени l_1 , м	Длина ступени l_2 , м	Амплитуда колебаний, A , мкм	Шероховатость R_a , мкм	Отклонения от круглости ΔR_{cm} , мкм
$d_1=0,06$ м, $d_2=0,03$ м, $l=0,16$ м,	0,12	0,04	0,55	0,3	1,3
	0,10	0,06	1,5	0,5	2,3
	0,08	0,08	0,75	0,4	1,4
	0,06	0,1	0,78	0,4	1,4

В таблице 1 приведены экспериментальные значения амплитуд вынужденных колебаний при одновременной работе резцов в зависимости от вылетов ступеней борштанги. Экспериментальные значения получены при одинаковых режимах резания при обработке стали 45: $n = 1500$ мин⁻¹, $s=0,06$ мм/об, $t_1=0,05$ мм, $t_2=0,05$ мм, материал резцов – Т15К6.

Амплитуды колебаний определялись на основе построения расчетной модели замкнутой динамической системы ОРС¹¹.

Уравнения замкнутой динамической системы станка, учитывающие динамические характеристики процесса резания при одновременной работе двух резцов имеют вид:

¹¹ Баланюк А. В. Колебания двухступенчатых консольных борштанг при тонком растачивании / А. В. Баланюк // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава, 2014. С. 131 – 139.

$$\begin{cases}
m_0 \ddot{y}_0 + b \dot{y}_0 + \frac{\delta_{22}}{\delta} y_0 - \frac{\delta_{02}}{\delta} y_2 = P_0 \sin \omega t + \frac{\delta_{01} \cdot \delta_{22} - \delta_{02} \cdot \delta_{12}}{\delta} P_{z1}; \\
m \ddot{y}_2 + \frac{\delta_{00}}{\delta} y_2 + \frac{\delta_{02}}{\delta} y_0 = P_{z2} + \frac{\delta_{00} \cdot \delta_{12} - \delta_{01} \cdot \delta_{02}}{\delta} P_{z1}; \\
T_p \dot{P}_{z1} + P_{z1} = -K_{p1} y_2 \frac{\delta_{12}}{\delta_{22}}; \\
T_p \dot{P}_{z2} + P_{z2} = -K_{p2} y_2, \\
\delta = \delta_{00} \cdot \delta_{22} - \delta_{02}^2, \\
m = m_{np} = 0,243 \cdot \left[m_1 \frac{l_1^3}{l^3} + m_2 \right].
\end{cases} \quad (10)$$

где: y_0 – колебательное перемещение массы m_0 ;

\ddot{y}, \dot{y} – вторая и первая производные по времени;

P_{z1}, P_{z2} – силы резания на соответствующих резцах;

T_p – инерционная постоянная стружкообразования;

K_{p1}, K_{p2} – коэффициенты резания на соответствующих резцах;

δ_{iK} – коэффициенты влияния, определяемые по правилу Верещагина с учетом угловых перемещений;

m_0 – инерционная характеристика шпинделя, задаваемая массой, приведенной к сечению фланца;

m_{np} – инерционная характеристика борштанги, задаваемая массой, приведенной к сечению наиболее удаленного резца.

Для решения данных уравнений разработано программное обеспечение.

Для оценки величин полного отклонения от круглости, а также отдельных статических погрешностей приведем их значения при растачивании двухрезцовой борштангой. На рис.4 приведены расчетные значения отдельных статических погрешностей при изменении длин ступеней борштанги при одновременной работе резцов №1 и №2.

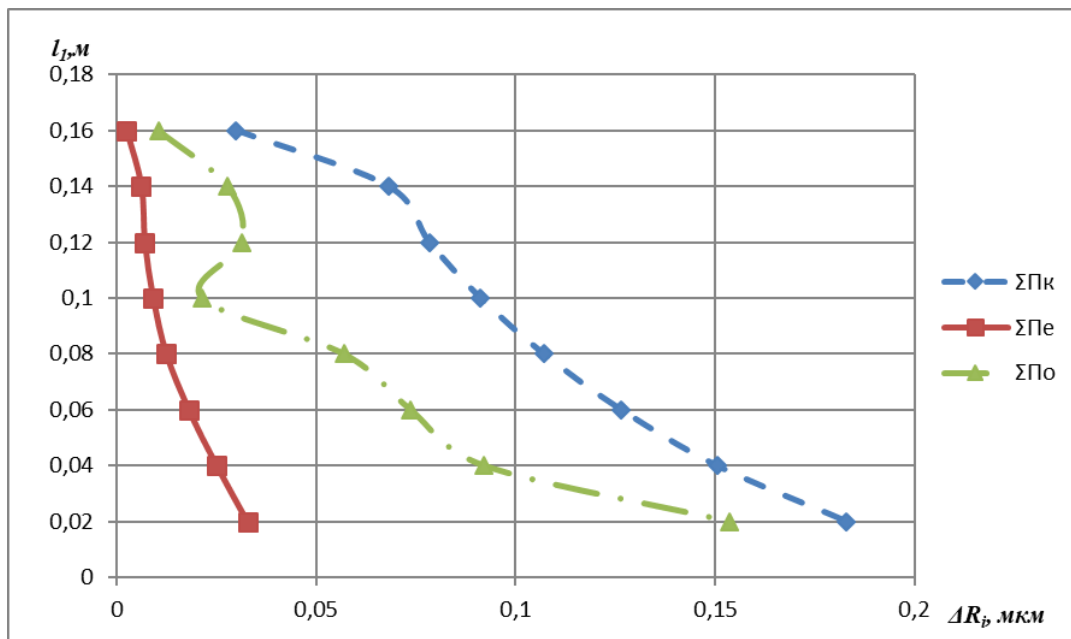


Рис. 4. Зависимость значений статических погрешностей от длин ступеней борштанги: обрабатываемый материал сталь 45, $d_{o1} = 0,065$ м, $d_{o2} = 0,035$ м, $l = 0,16$ м, $s = 0,06$ мм/об, $n = 1500$ мин⁻¹, $t_1 = t_2 = 0,05$ мм.

Видно, что эти зависимости, в общем, увеличиваются с увеличением длины второй ступени, хотя на изменении погрешности P_o имеется локальный минимум. В данном случае влияние анизотропии жесткости является определяющим.

Полное отклонение от круглости расточенного отверстия с учетом статических и динамической составляющих приведено на рисунке 5.

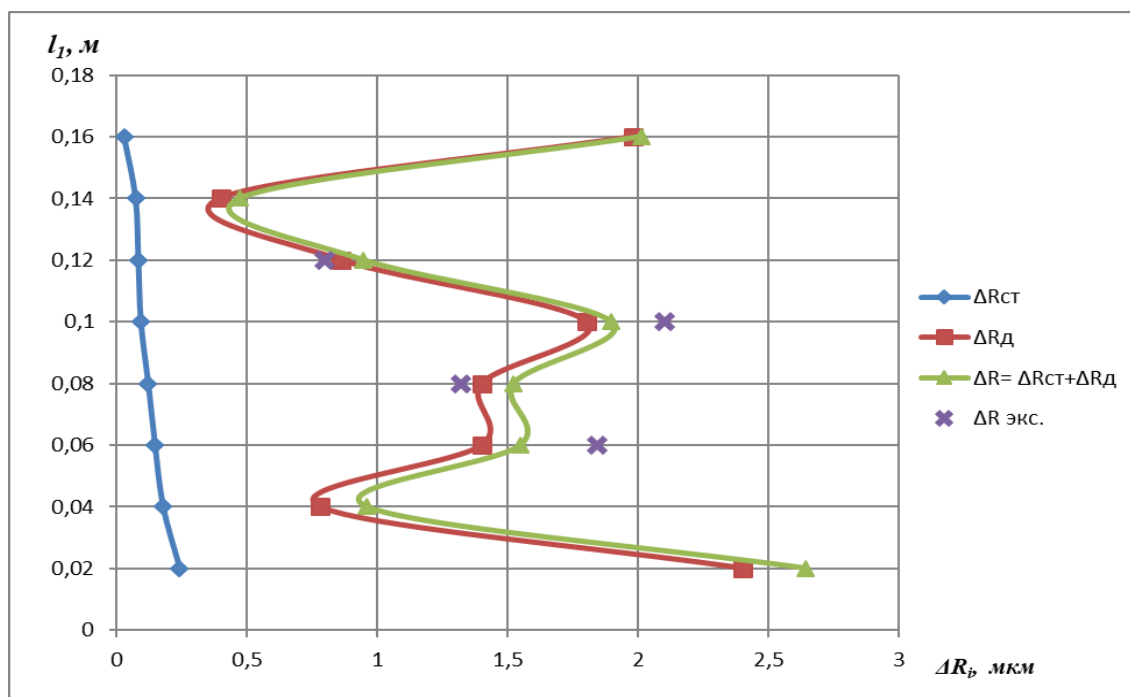


Рис. 5. Изменения величин погрешностей при многорезцовом растачивании: обрабатываемый материал сталь 45, $do_1 = 0,065$ м, $do_2 = 0,035$ м, $l = 0,16$ м, $s = 0,06$ мм/об, $n = 1500$ мин⁻¹, $t_1 = t_2 = 0,05$ мм.

Видно, что при многорезцовом растачивании отношения значений минимальных динамических погрешностей к значениям суммарных статических погрешностей находятся в диапазоне от 5 до 8. Становится очевидным, что при многорезцовом тонком растачивании динамические взаимодействия определяющим образом влияют на погрешности. В абсолютном выражении статические погрешности изменяются в пределах от 0,03 до 0,24 мкм, а динамические погрешности находятся в пределах от 0,4 до 2 мкм. Отличительной особенностью изменения суммарных погрешностей отклонений от круглости поперечного сечения при многорезцовом растачивании является чередование их повышенных и пониженных значений в соответствии с чередованием амплитуд вынужденных колебаний.

При обработке отверстия за один проход на точность формы поперечного сечения главным образом влияет податливость системы шпиндель-борштанга (рис. 4), среднее значения этой погрешности равны 0,1 мкм. Среднее значение погрешности P_o равно 0,05 мкм, а среднее значение P_e равно 0,01 мкм.

На рис. 5 сопоставлены значения ΔR , полученные расчетом и экспериментом; расхождение между ними составляет не более 20%. Приведенные зависимости отражают также тот факт, что при обработке ступенчатых отверстий минимальные погрешности образуются при длинах ступеней, не соответствующих максимальной жесткости борштанги.

Заключение. Разработанная расчетная методика, учитывающая динамические взаимодействия при растачивании, уточняет и развивает общие представления и способы определения точности поперечного сечения при многорезцовом растачивании: статические погрешности от неточности установки заготовки, анизотропию податливости по углу поворота и отклонения от круглости отверстия заготовки, а также динамические

погрешности. Погрешности P_o и P_e возникают из-за изменения сил резания в результате переменности срезаемого припуска, а погрешность P_k определяется свойствами шпиндельного узла.

Установлено, что отличительной особенностью изменения суммарных погрешностей отклонений от круглости поперечного сечения при многорезцовом растачивании является чередование их повышенных и пониженных значений в соответствии с чередованием амплитуд вынужденных колебаний. При многорезцовом тонком растачивании динамические погрешности являются доминирующими и превышают статические в 5-6 раз. Разработана прикладная программа проектирования операции чистового многорезцового растачивания, которая позволяет производить уточненные расчеты без использования номограмм и повысить эффективность прогнозирования погрешностей.

References:

1. Брижан Т.М. Условия повышения точности обработки отверстий / Т.М. Брижан // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. тр. 4-ой международ. науч.-практ. конф. В 3-х томах, Том 1. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 104-109.
2. Лінчевський П.А. 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
3. Кочанов Ю. С. Алмазно-расточные станки. Источники погрешностей при тонком растачивании. / Ю. С. Кочанов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. – Орел. – 2014. – № 6(308). – С. 82-85.
4. Бромберг Б.М., Дашевский Т.Б., Ламдон Э.А., Ломакин В.К. Алмазно – расточные станки. – М.: Машиностроение, 1965. – 241 с.
5. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебное пособие. – 3-е изд. – СПб.: Лань, 2010. – 512 с.
6. Сулов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Сулов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
7. Кудинов В.А. Динамика станков. – Машиностроение, 1967. – 360 с.
8. A. Vansal and M. Law. A Receptance Coupling Approach to Optimally Tune and Place Absorbers on Boring Bars for Chatter Suppression. 8th CERJP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018)- P 167–170.
9. Knut Sorby, Dan Ostling. Precision turning with instrumented vibration-damped boring bars. 8 th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018). P. 666-669.
10. Оргіян А.А. Расчеты погрешностей тонкого растачивания гладких и ступенчатых отверстий / Оргіян А.А., Баланюк А.В., Албакуш Аимен / Сучасні технології в машинобудуванні [Текст]: зб. наук. праць. – Вип. 10 – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – 343 с. – С. 235-249.
11. Баланюк А. В. Колебания двухступенчатых консольных борштанг при тонком растачивании / А. В. Баланюк // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава, 2014. С. 131-139.