



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Обеспечение точности формы отверстий, полученных при чистовой обработке методом растачивания

Вадим Стельмаков<sup>а, \*</sup>, Михаил Гимадеев<sup>б</sup>, Александр Никитенко<sup>с</sup>

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, г. Хабаровск, 680035, Россия

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-2763-1956>,  009062@togudv.ru; <sup>б</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6685-519X>,  009063@togudv.ru;

<sup>с</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4729-5558>,  005392@togudv.ru

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91:681.5

#### История статьи:

Поступила: 02 февраля 2025

Рецензирование: 25 февраля 2025

Принята к печати: 27 марта 2025

Доступно онлайн: 15 июня 2025

#### Ключевые слова:

Точность формы

Радиальное смещение

ность геометрической формы относится к макроотклонениям и при обработке отверстий обычно регламентируется отклонениями от круглости и цилиндричности. В практике наиболее часто допуски формы на отверстия назначают исходя из допуска на размер в соотношении  $0,25 \dots 0,5 IT$ .

Наиболее часто для обработки высокоточных отверстий на чистовых операциях используются такие методы обработки, как развертывание и растачивание. Операция растачивания широко применяется в современном машиностроении. Расточные инструменты бывают многолезвийные и однолезвийные. Многолезвийные инструменты используются чаще всего для черновой обработки отверстий, а однолезвийные расточные инструменты нашли свое применение в операциях чистового и тонкого растачивания.

Расточные инструменты относятся к инструментам, настраиваемым на выполняемый размер, это является их главным преимуществом. Однако на практике отмечается высокая трудоемкость операции растачивания, связанная с настройкой на исполнительный размер [1–4]. Приходится применять многопроходную обработку с предварительной настройкой резца, последующим измерением и повторным проходом. Это обстоятельство сведено к минимуму за счет автоматизированных систем настройки расточной головки на размер обработки в рамках обрабатываемого центра с использованием измерительных систем.

Метод растачивания позволяет достигать высоких параметров точности по диаметальному размеру, а также по расположению оси [1, 5] в сравнении с инструментами типа разверток, зенкеров, а также и отверстий, полученных методом фрезерования [6]. Это связано напрямую с возникающими в процессе обработки силами резания, которые при методе чистового растачивания значительно меньше. Однако в работе [5] отмечается наличие упругих деформаций (радиальное смещение расточного резца) и важность этого фактора при растачивании глубоких отверстий. В работе предлагается использовать полуаналитический динамический метод для определения величины упругих деформаций расточного резца. В работах [7–9] исследуются различные подходы к динамическим системам, описывающие упругие деформации расточных инструментов в процессе обработки.

В работе [1] для устранения упругих деформаций расточного инструмента в процессе механической обработки также исследовался вопрос, связанный с применением встроенных тензодатчиков в расточном резце. Датчики, согласно исследованию, производят измерение изгиба расточного резца в реальном времени. Данные о деформации передавались в систему ЧПУ станка через программируемый логический контроллер. На их основе система автоматически компенсировала изгиб путем добавления корректирующего смещения по координатным осям станка. Авторами работы также отмечается, что разработанная система позволяет значительно снизить погрешность диаметрального размера отверстия, особенно при малых глубинах резания.

Некоторыми авторами [10] рассматривается система онлайн-мониторинга [11] операции растачивания. Авторами предложена методика для эффективного онлайн-мониторинга состояния инструментов, которая включает в себя использование адаптивных нейро-нечетких систем (ANFIS) для измерения степени износа и искусственных нейронных сетей (BPN) для классификации состояния инструментов. Это позволяет своевременно останавливать процесс растачивания при достижении порогового значения износа, что способствует обеспечению точности обработки и предотвращению брака. Работа искусственных нейронных сетей и нейро-нечетких систем основана на регистрации сигналов о величинах сил резания (тангенциальной, продольной и радиальной), получаемых с пьезоэлектрических динамометров.

Некоторыми научными коллективами ведется работа по разработке и оптимизации конструкций расточных инструментов. Так, авторами [12] предложено новое устройство ультразвуковой эллиптической вибрационной расточки (Ultrasonic elliptical vibration boring). Результаты исследований показали, что это устройство эффективно снижает вибрации в процессе обработки и способствует улучшению качества обрабатываемой поверхности. Авторами [13] исследуется вибрационная устойчивость процесса растачивания с применением динамических

и жесткости значительно снижает амплитуду вибраций расточного резца.

Основным параметром достигнутой точности в рассмотренных работах являлся диаметральный размер получаемых отверстий. В этих работах также затрагивались вопросы обеспечения точности формы (отклонения от круглости и цилиндричности). На сегодняшний день измерение отклонений формы отверстий производится в соответствии с международными стандартами ISO 12181-1:2011 и ISO 4291:1985, регламентирующими следующие основные методы оценки [14, 15]:

*Least Squares Circle* (LSC) – метод наименьших квадратов;

*Minimum Circumscribed Circle* (MCC) – метод наименьшей описанной окружности;

*Maximum Inscribed Circle* (MIC) – метод наибольшей описанной окружности;

*Minimum Zone Circle* (MZC) – метод наименьшего зазора.

Авторами [18] описаны математические модели для каждого из методов, а также проведены эксперименты с целью определения эффективности оценки каждого из методов. По результатам работы авторами также предложен усовершенствованный алгоритм оценки, позволяющий снизить ошибку измерений при использовании метода (MZC). В работе [19] описывается разработка нового метода оценки отклонения от круглости, основанного на улучшенном алгоритме «летучей мыши» (Bat Algorithm, BA). Предложенный метод базируется на методе наименьшего зазора, он преобразует задачу оценки отклонения от круглости в задачу оптимизации, в рамках которой требуется найти оптимальный центр окружности. Авторы работы отмечают высокую точность и эффективность разработанного метода в оценке отклонения от круглости в сравнении с традиционными методами.

В работе [20] исследуется применение морфологических фильтров для функциональной оценки профиля детали и производится их сравнение с уже известными 2RC-фильтром и фильтром Гаусса. Авторы работы предлагают использовать методы математической морфологии, основанные на теории альфа-форм, в комбинации с фильтром Гаусса с точки зрения определения трибологических характеристик поверхностей детали.

Рассмотренные исследования направлены на повышение точности и оптимизацию процесса измерений, что немаловажно для достижения высоких функциональных характеристик изготавливаемых деталей.

Исходя из анализа современных исследований можно сделать вывод о том, что большинство работ направлено на изучение вопроса обеспечения точности диаметрального размера при методе растачивания, однако немаловажно и рассмотрение вопроса обеспечения точности формы. Таким образом, **целью настоящей работы** является прогнозирование радиального смещения оси инструмента и разработка методов обеспечения точности формы отверстий, полученных при чистовой обработке методом растачивания.

В настоящей работе ставятся следующие **задачи**.

1. Определить взаимосвязь между величинами отклонений от круглости и цилиндричности обрабатываемых отверстий и технологическими параметрами механообработки.

2. Определить величину радиального смещения расточного инструмента за счет разработки математической модели с возможностью прогнозирования величины погрешности полученных отверстий.

3. Разработать методику назначения переходов, учитывающую отклонение оси отверстий на черновых этапах и радиальные смещения чистового инструмента с учетом влияния величины и неравномерности припуска

тральных размеров и координат положения центра обработанных отверстий в трех различных сечениях использовался измерительный шуп модели TS 640 фирмы Heidenhain.

Измерения параметров отклонений от круглости и цилиндричности обрабатываемых отверстий производилось на установке Roundcom-41C. В данной работе для оценки отклонений от круглости был выбран метод наибольшей вписанной окружности (MIC) [18]. Основные факторы, влияющие на формирование отклонений от круглости, определялись с помощью гармонического анализа [16, 17]. На рис. 1 представлены спектрограммы коэффициентов разложения, полученные при измерении детали на кругломере.

Обрабатываемыми материалами в рамках данной работы выбраны алюминиевый сплав Д16Т, который широко используется в авиационном и автомобилестроении за счет своих физико-механических свойств, и конструкционная сталь 40Х с широкой областью применения в машиностроении.

Предварительная обработка отверстий осуществлялась методом сверления, сверлом фирмы Sandvik Coromant (DIN1899) R840-1400-30-A1A 1220. Достижение точности диаметрального размера соответствует восьмому качеству.

Обработка заготовок из алюминиевого сплава производилась при следующих режимах: подача на оборот  $F_u = 0,05, 0,075, 0,1$  мм/об, частота вращения  $n = 800$  мин<sup>-1</sup>. Обработка заготовок из стали осуществлялась при следующих режимах: подача на оборот  $F_u = 0,05, 0,075, 0,1$  мм/об, частота вращения  $n = 100$  мин<sup>-1</sup>. Глубина обработки составила  $b = 20$  мм, вылет инструмента – 179,691 мм, вылет расточного резца из расточной оправки – 70 мм, диаметр обрабатываемых отверстий был выбран в диапазоне 14...17 мм. Для механической обработки использовались расточная оправка C5-391.37A-16 070 А и твердосплавной расточной резец R429U-E16-11066TC06 фирмы Sandvik Coromant.

## Результаты и их обсуждение

Обработка заготовок производилась на двух обрабатывающих центрах, имеющих разную компоновку исполнительных органов. Режимы резания были выбраны исходя из требований к качеству и точности обрабатываемых поверхностей, а также с учетом рекомендаций производителя инструмента. Однако в процессе механообработки заготовок из конструкционной стали подбор режимов резания был итерационный.

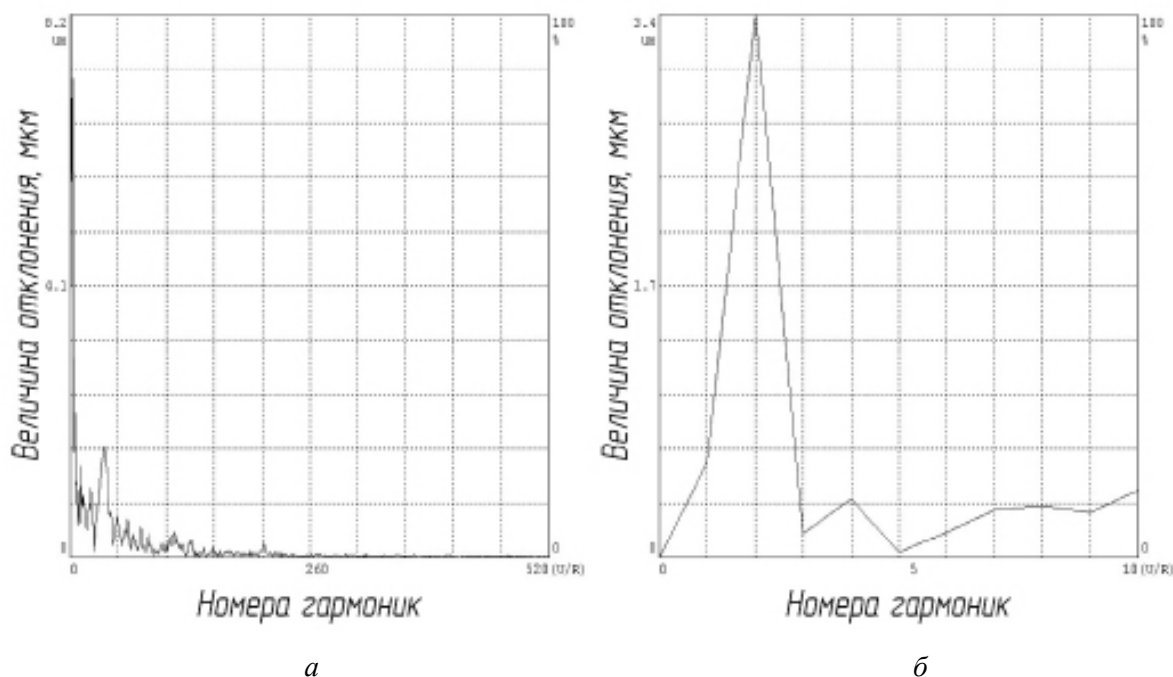


Рис. 1. Спектрограммы коэффициентов разложения:

а – в масштабе всех зафиксированных гармоник; б – в диапазоне от 0 до 10-й гармоники

Рекомендуемые режимы обработки приводили к высоким вибрациям и плохому качеству получаемых поверхностей (рис. 2). Коррекция в сторону увеличения скорости резания до  $V = 84$  м/мин привела к поломке режущей пластины, но при уменьшении значения скорости резания до 3 м/мин удалось достичь необходимых параметров по качеству и точности поверхности с отсутствием вибраций в процессе обработки. Этот факт указывает на наличие зависимости скорости резания от длины расточного инструмента при обеспечении отсутствия вибрации в процессе обработки. Тем не менее следует упомянуть, что снижение скорости резания сказалось на производительности процесса растачивания – длительность механообработки увеличилась в 1,5 раза.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 3 и 4. Анализ этих зависимостей показывает, что с увеличением подачи возрастает величина отклонения от круглости и цилиндричности. Этот характер зависимости сохраняется как для алюминиевого сплава, так и для конструкционной стали. Кроме того, обработка на различных обрабатывающих центрах также проявляет определенную зависимость. Обработка алюминиевых заготовок на обрабатывающем центре DMU 50 ecoline имеет более низкие показатели отклонения от круглости

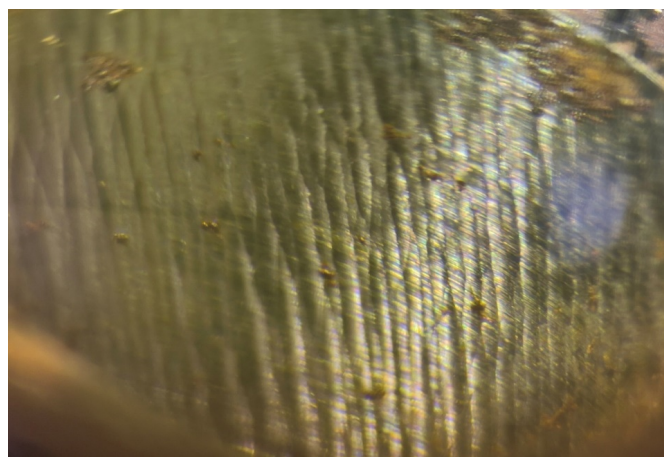


Рис. 2. Фотография поверхности отверстия, полученная при сильных вибрациях в процессе обработки

Fig. 2. Photograph of the hole surface obtained as a result of vibrations that occur during processing

и цилиндричности в сравнении с результатами, полученными на DMC 635 V ecoline.

Полученные отверстия измерялись для оценки точности диаметрального размера и для определения точности позиционирования оси. Измерения производились в трех сечениях, равномерно распределённых на всей длине отверстия, измерительным щупом. Результаты измерений по оценке точности позиционирования оси отверстия при методе растачивания вне зависимости от используемой подачи находятся в следующих пределах: для DMU 50 ecoline –

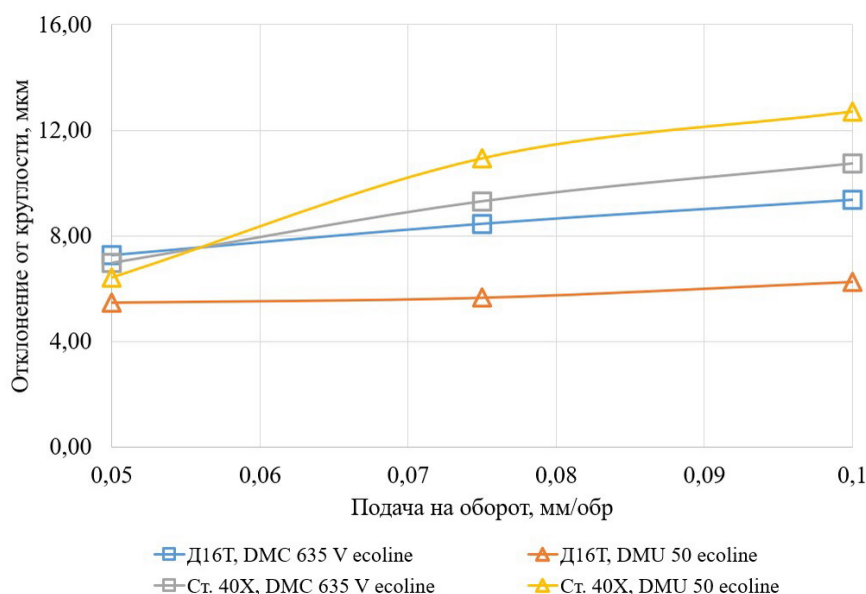


Рис. 3. График зависимости отклонения от круглости от подачи на оборот

Fig. 3. Graph of the dependence of deviation from roundness on feed rate per revolution

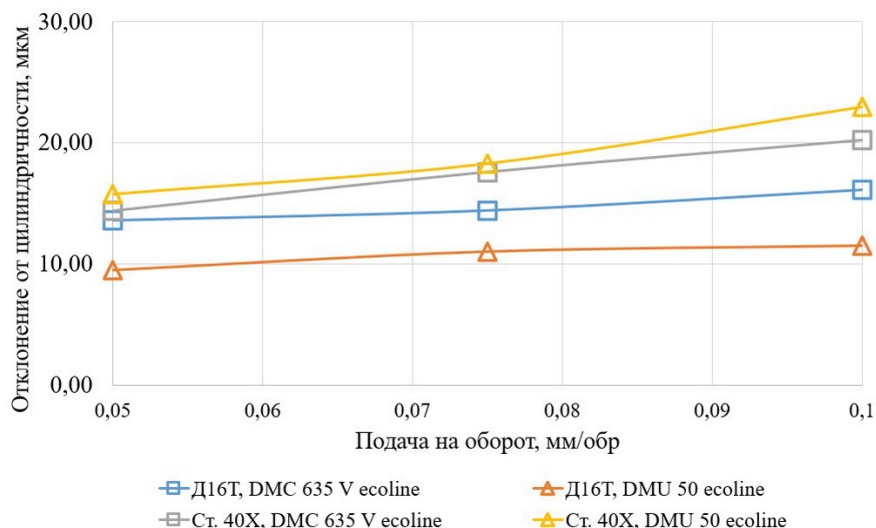


Рис. 4. График зависимости отклонения от цилиндричности от подачи на оборот

Fig. 4. Graph of the dependence of the deviation from cylindricity on feed rate per revolution

13 мкм в диаметральном выражении; для DMC 635 V ecoline – 5 мкм в диаметральном выражении. Указанное обстоятельство подтверждает факт о высокой степени точности позиционирования оси при методе растачивания [1, 5].

Необходимо обратить внимание на параметр отклонения от цилиндричности. В ходе измерений была зафиксирована коническая форма полученных отверстий (рис. 5). Это обстоятельство связано с радиальным смещением инструмента в процессе механической обработки и непосредственно с неравномерностью припуска.

Радиальное смещение оказывает значительное влияние на диаметральный размер отверстия, а в комбинации с неравномерным припуском – и на отклонение от цилиндричности получаемых отверстий. При небольших отклонениях от округлости в разных сечениях по длине отверстия происходит уменьшение диаметрального размера. Следовательно, рассчитав величину радиального смещения расточного резца, можно спрогнозировать величину погрешности диаметрального размера отверстия, а в случае неравномерности припуска также и величину

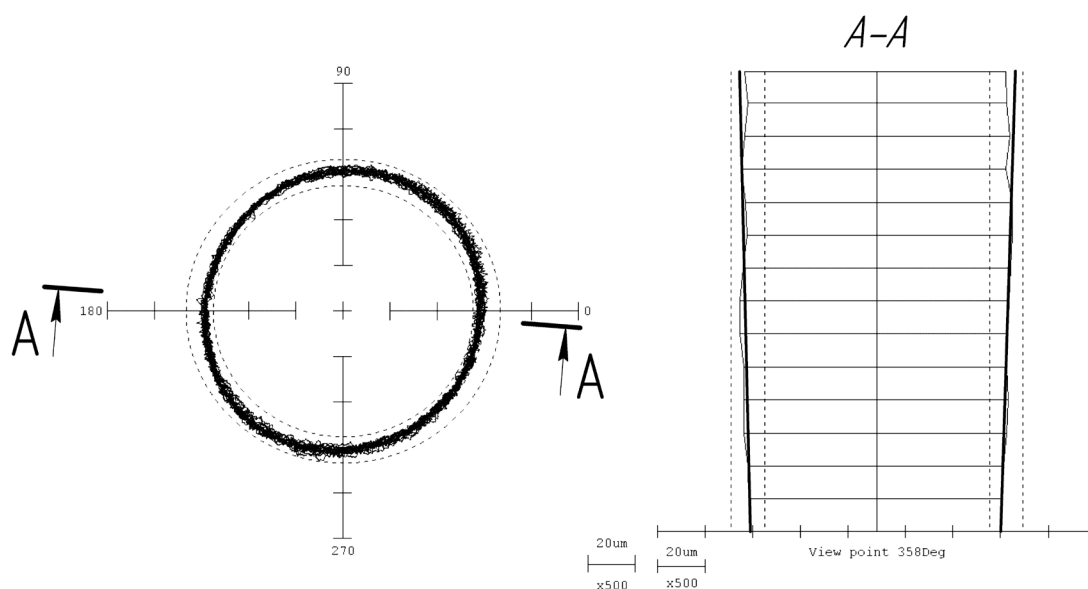


Рис. 5. Отклонение от цилиндричности в сечении по длине отверстия

Fig. 5. Deviation from cylindricity along the hole length

отклонения от цилиндричности. Для этого обратимся к кинематике и динамике процесса чистового растачивания (рис. 6). Кинематика процесса резания в исследуемом случае состоит в следующем: расточной инструмент при определении количественных параметров главного и вспомогательного движений (частота вращения и подача) совершает механическую обработку путем снятия стружки. Характер движения при сочетании поступательного и вращательного движений представляет собой винтовую линию. Шаг витков в данном случае будет равен параметру подачи на оборот (мм/об).

В процессе съема материала расточным резцом возникает сила резания, которая при действии ее в радиальном направлении и приводит к смещению расточного резца. Для определения отгибающей составляющей воспользуемся формулой по определению силы резания из теории резания [21]:

$$P = bsP_c,$$

где  $b$  – глубина обработки;  $s$  – толщина срезаемого слоя;  $P_c$  – удельная сила резания. Сочетание глубины и толщины срезаемого слоя дает нам геометрический показатель площади срезаемого слоя ( $S_{cp}$ ).

Принимая во внимание кинематику процесса резания, получим область  $abcd$ , характеризующую площадь срезаемого слоя  $S_{cp}$  при движении

расточного резца в случае чистового растачивания отверстия (рис. 7).

Форма области  $abcd$  образуется путем ориентации инструмента в начальном положении I и конечном положении II за один оборот на величину перемещения по оси  $z$ . Форма, как видно из рис. 7, образуется пересечением двух окружностей, характеризующих радиус скругления режущей пластинки инструмента ( $R_{пл}$ ). Таким образом, можно заключить, что данная область образуется одной функцией окружности  $y = f(x)$ , но в разные моменты.

Площадь образованной области  $abcd$  согласно рис. 7 будет находиться так:

$$S_{cp} = S_1 + S_2 - S_3, \quad (1)$$

где  $S_1$  – площадь под функцией окружности, описывающей геометрию режущей пластины в пределах от точки  $c$  до  $d$ , мм<sup>2</sup>;  $S_2$  – площадь под функцией окружности, описывающей геометрию режущей пластины в пределах от точки  $b$  до  $c$ , мм<sup>2</sup>;  $S_3$  – площадь под функцией окружности, описывающей геометрию режущей пластины в пределах от точки  $a$  до  $b$ , мм<sup>2</sup>;  $S_{cp}$  – площадь срезаемого слоя материала, зависящая от подачи на оборот, мм<sup>2</sup>.

Выделение пределов области  $abcd$  для расчета площади срезаемого слоя напрямую связано с квадрантами окружности, в рамках которых данная функция  $y = f(x)$  определена.

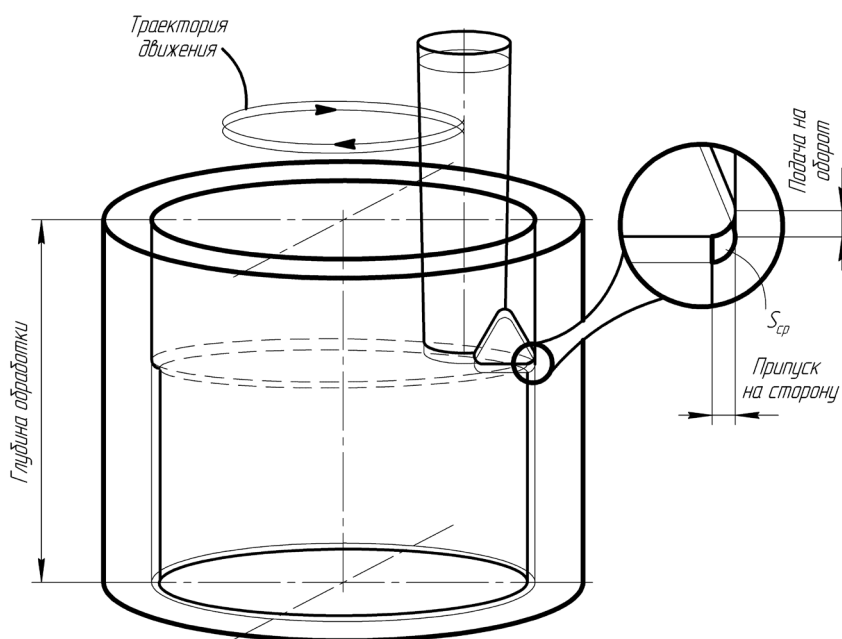


Рис. 6. Кинематика процесса растачивания

Fig. 6. Kinematics of the boring process

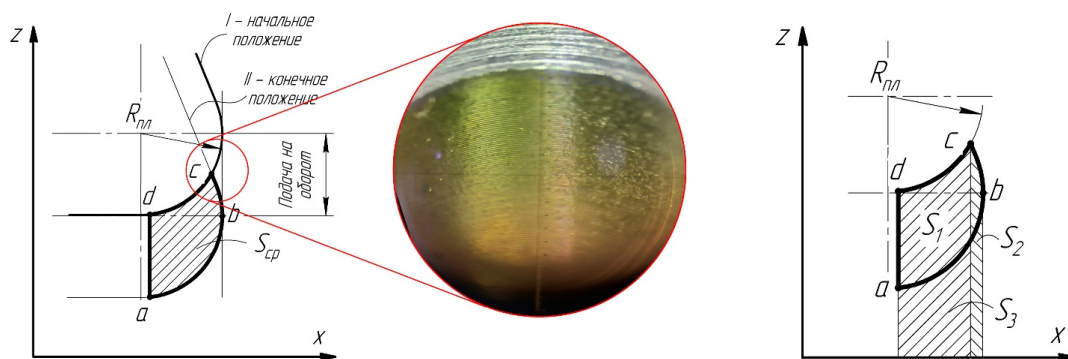


Рис. 7. Определение площади снимаемого слоя

Fig. 7. Determining the area of the layer to be removed

Таким образом, принимая во внимание уравнение, описывающее функцию окружности, получим:

$$S_{ср} = \int_c^d y_0 - \sqrt{R_{пл}^2 + (x - x_0)^2} + \int_b^c y_0^{II} + \\ + \sqrt{R_{пл}^2 + (x - x_0^{II})^2} - \int_a^b y_0^{II} - \sqrt{R_{пл}^2 + (x - x_0^{II})^2},$$

где  $x_0$  и  $y_0$  – координаты центра радиуса скругления пластины в начальном положении I;  $x_0^{II}$  и  $y_0^{II}$  – координаты центра радиуса скругления пластины в конечном положении II.

Производя преобразования подынтегральных функций методом интегрирования по частям, получим

$$S_{ср} = \left( y_0 x - \frac{1}{2} \left( (x - x_0) \sqrt{R_{пл}^2 + (x - x_0)^2} - R_{пл}^2 \arcsin \left( \frac{x - x_0}{R_{пл}} \right) \right) \right) \Big|_c^d + \\ + y_0^{II} x \Big|_b^c + \frac{1}{2} \left( (x - x_0^{II}) \sqrt{R_{пл}^2 + (x - x_0^{II})^2} - R_{пл}^2 \arcsin \left( \frac{x - x_0^{II}}{R_{пл}} \right) \right) \Big|_b^c - \\ - y_0^{II} x \Big|_a^b - \frac{1}{2} \left( (x - x_0^{II}) \sqrt{R_{пл}^2 + (x - x_0^{II})^2} - R_{пл}^2 \arcsin \left( \frac{x - x_0^{II}}{R_{пл}} \right) \right) \Big|_a^b. \quad (2)$$

Уравнение (2) позволяет вычислить площадь срезаемого слоя. Для оптимизации вычислений ось  $y$  системы координат необходимо проводить через центр радиуса скругления режущей пластины, где координаты  $x_0$  и  $x_0^{II}$  будут равны нулю, а разность координат  $y_0$  и  $y_0^{II}$  отражает величину подачи на оборот.

Таким образом, принимая во внимание формулы (1) и (2), расчетные значения силы резания

для исследуемых образцов представлены в таблице.

Моделируя ситуацию с неравномерностью припуска на основании расчетной формулы по определению площади срезаемого слоя, можно заключить, что неравномерность припуска 0,1 мм приводит к возрастанию силы резания в 2 раза по сравнению с номинальной для чистой обработки и, как следствие, к увеличению величины погрешности.

Таким образом, на этапе предварительной настройки расточного резца необходимо выполнить оценку диаметрального размера отверстия по всей длине обработки с использованием измерительного щупа. В случае выявления отклонений положения центра оси отверстия в диапазоне 0,05...0,1 мм рекомендуется выполнить предварительный проход (получистовое растачивание). Дополнительный переход позволит устранить неравномерность припуска, превышающую расчетные значения с учетом допуска размера и формы. Данная методика позволяет минимизировать количество переходов в зависимости от точности позиционирования оси на предыдущем переходе.

Следующим этапом было определение величины радиального смещения оси инструмента при чистовом растачивании отверстий. В момент врезания режущего инструмента в материал заготовки на расточную оправку в зоне контакта начинает действовать сила резания. Оправка инструмента, как показано на рис. 8, представляет собой коническую поверхность с закрепленной на ее конце режущей пластиной. Эта схема является системой с переменной жесткостью с одной степенью свободы, в крайней точке которой действует сила резания  $P$ :

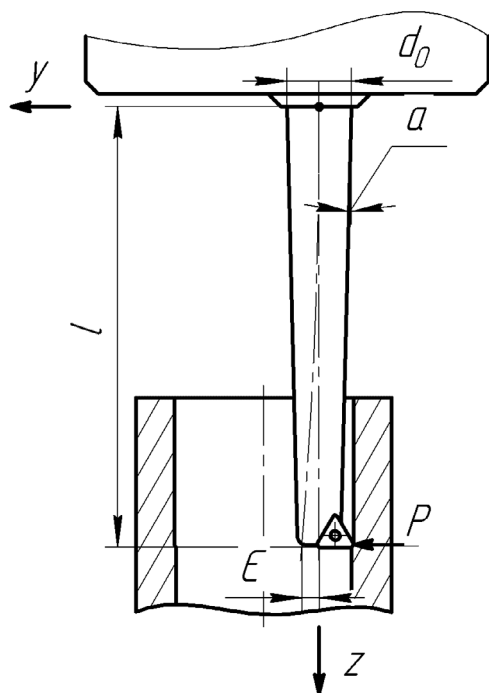


Рис. 8. Схема динамики процесса растачивания

Fig. 8. Schematic of the boring process dynamics

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varepsilon}{dz^2} = \frac{M_0}{E J_x^0}; \\ M_0 = k(z) M(z) = \frac{J_x^0}{J_x(z)} M(z), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – координата изгиба оси инструмента, мм;  $z$  – координата длины инструмента, мм;  $M_0$  – приведенный изгибающий момент, Н·мм<sup>2</sup>;  $J_x^0$  – момент инерции расточной оправки в точке начала системы координат, мм<sup>4</sup>;  $k(z)$  – коэффициент приведения;  $M(z)$  – функция изгибающего момента;  $J_x(z)$  – функция момента инерции.

Жесткость данной системы изменяется по следующей зависимости:

$$J_x(z) = \frac{\pi d(z)^4}{64} \rightarrow d(z) = d_0 - 2z \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $d(z)$  – функция изменения диаметра;  $d_0$  – диаметр расточной оправки в точке начала системы координат, мм;  $\alpha$  – угол конусной поверхности расточной оправки, рад.

Решение системы уравнений (3) состоит в приведении системы с переменной жесткостью к системе с постоянной жесткостью. Для этого составим дифференциальное уравнение, описывающее функцию изменения приведенного изгибающего момента:

$$dM_0 = P(k(z)(l - z - dz) - l),$$

где  $l$  – длина расточного резца, мм.

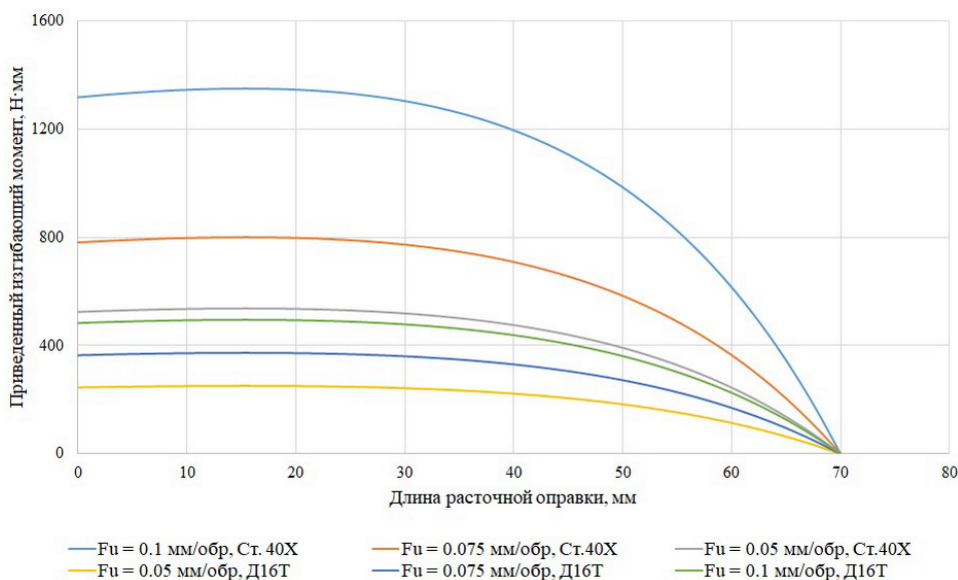


Рис. 9. Эпюры приведенных изгибающих моментов

Fig. 9. Diagrams of reduced bending moments

На рис. 10 представлены зависимости значения радиального смещения резца от подачи на оборот. Анализ этих данных позволяет сделать вывод о том, что измеренные значения максимального смещения инструмента отличаются от расчетных не более чем на 17 %. Таким образом, применяя описанное выше дифференциальное уравнение, можно аналитически вычислить радиальное смещение инструмента в максимальной точке и численно спрогнозировать величину погрешности получаемых отверстий при чистовом растачивании.

В настоящей работе рассмотрены основные факторы, которые влияют на точность формы отверстий, получаемых методом растачивания. Применение разработанных алгоритмов и моделей дает возможность технологу назначать технологические параметры обработки в зависимости от заданной служебным назначением точности.

## Выводы

Установлены зависимости отклонения от круглости и цилиндричности от подачи на оборот. С увеличением последней увеличивается и значение отклонения от круглости и цилиндричности.

Установлено, что при чистовом растачивании, несмотря на небольшой припуск, жёсткость

расточного резца вносит существенный вклад в точность получаемых отверстий (примерно 20–30 % от величины допуска).

Разработан алгоритм для определения площади срезаемого слоя для операций чистового растачивания, учитывающий геометрические параметры режущего инструмента, технологические параметры обработки и позволяющий определить расчетное значение силы резания.

Разработана модель процесса радиального смещения расточного резца, которая учитывает данные о технологических параметрах процесса чистовой обработки отверстий и позволяет определить величину радиального смещения расточного резца, используемую при расчете погрешности.

Разработана методика назначения переходов, учитывающая отклонение оси отверстий на черновых этапах и влияние величины припуска на основе разработанных математических моделей, которая включает в себя предварительную настройку расточного резца и внесение коррекции на радиус инструмента.

## Список литературы

1. Real-time compensation of tool deflection using a sensor embedded boring bar with wireless signal feedback to the machine tool controller

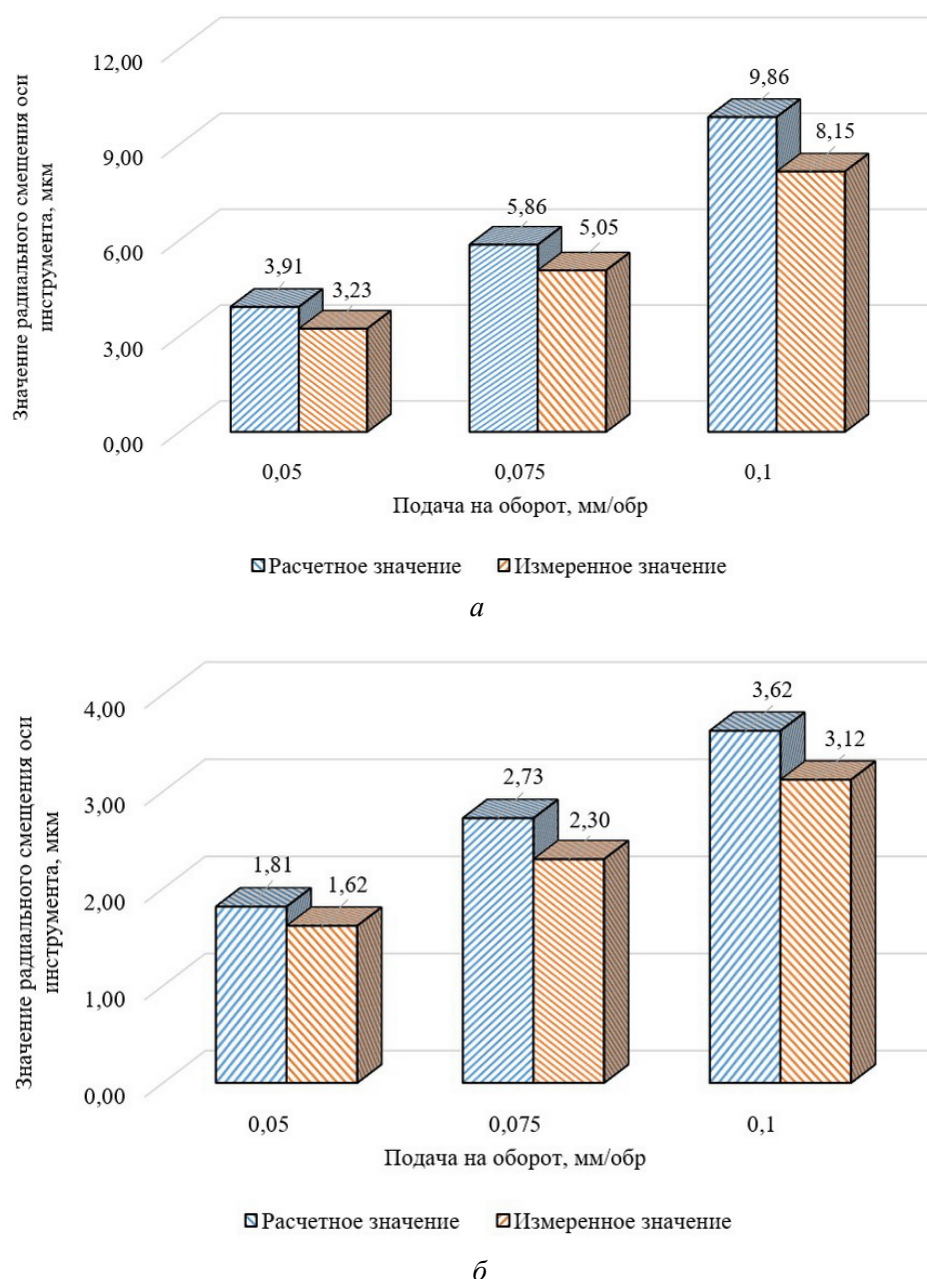


Рис. 10. Зависимость величины радиального смещения оси расточного резца от подачи на оборот:

а – материал Ст. 40Х; б – материал Д16Т

Fig. 10. Dependence of the radial displacement of the boring cutter axis on feed rate per revolution:

а – material: steel 0.4 C-Cr; б – material: aluminum alloy Al-Cu-Mg-Mn (quenched and naturally aged aluminum alloy, containing  $\leq 94.7\%$  Al;  $\leq 4.9\%$  Cu;  $\leq 1.8\%$  Mg;  $\leq 0.9\%$  Mn)

Conference on High Performance Cutting (HPC 2020). – 2021. – Vol. 101. – P. 102–105. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.191.

2. Черноиванова А.Г., Тарасенко Б.Ф., Оськин С.В. Ресурсосберегающее устройство для расточки корпусных отверстий // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2015. – № 2–3. – С. 81–88.

3. Маслов А.Р., Молодцов В.В. Моделирование колебаний инструментальной системы для растачивания отверстий // Вестник МГТУ «Станкин». – 2014. – № 4. – С. 196–199.

4. Повышение точности растачивания отверстий в сварных корпусах / А.Л. Бахно, А.С. Ямников, А.С. Васильев, А.О. Чуприков // СТИН. – 2019. – № 6. – С. 38–40.

5. Du W., Wang L., Shao Y. A semi-analytical dynamics method for spindle radial throw in boring process // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – Vol. 96. – P. 110–124. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.047.
6. Stelmakov V.A., Gimadeev M.R., Iakuba D.D. Research on the process of forming cylindrical surfaces of holes during milling finish with end mills using a circular interpolation strategy // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 2. – Cham: Springer, 2021. – P. 917–925. – DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9\_106.
7. Model-based error motion prediction and fit clearance optimization for machine tool spindles / H. Cao, B. Li, Y. Li, T. Kang, X. Chen // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – Vol. 133. – P. 106252. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106252.
8. A novel multi-probe method for separating spindle radial error from artifact roundness error / Y. Chen, X. Zhao, W. Gao, G. Hu, S. Zhang, D. Zhang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 93. – P. 623–634. – DOI: 10.1007/s00170-017-0533-5.
9. Gokulu T., Defant F., Albertelli P. Stability analysis of multi-insert rotating boring bar with stiffness variation // *Journal of Sound and Vibration*. – 2024. – Vol. 586. – P. 118497. – DOI: 10.1016/j.jsv.2024.118497.
10. On-line monitoring of boring tools for control of boring operations / T.I. Liu, A. Kumagai, Y.C. Wang, S.D. Song, Z. Fu, J. Lee // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2010. – Vol. 26. – P. 230–239. – DOI: 10.1016/j.rcim.2009.11.002.
11. Digital twin-based anomaly detection for real-time tool condition monitoring in machining / Z. Liu, Z.Q. Lang, Y. Gui, Y.P. Zhu, H. Laalej // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2024. – Vol. 75. – P. 163–173. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.06.004.
12. A novel design for double-bending elliptical vibration boring device and its performance evaluation / Y. Zheng, C. Hu, M. Wang, Z. Wu, J. Zhang, J. Xu // *Ultrasonics*. – 2025. – Vol. 149. – P. 107584. – DOI: 10.1016/j.ultras.2025.107584.
13. Nonlinear system optimization of cutting tools with dynamic vibration absorbers in deep hole boring: a stability analysis / L. Li, Y. Ren, Z. Shen, J. Lu, L. Tong // *Alexandria Engineering Journal*. – 2025. – Vol. 112. – P. 246–253. – DOI: 10.1016/j.aej.2024.10.113.
14. A novel approach to machining condition monitoring of deep hole boring / W. Xiao, Y. Zi, B. Chen, B. Li, Z. He // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2014. – Vol. 77. – P. 27–33. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.10.009.
15. Elerian F.A., Helal W.M.K., AbouEleaz M.A. Methods of roundness measurement: an experimental comparative study // *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. – 2021. – Vol. 44 (9). – P. 173–183. – DOI: 10.13140/RG.2.2.18930.43206.
16. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission / D.E. Lee, I. Hwang, C.M.O. Valente, J.F.G. Oliveira, D.A. Dornfeld // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. – Vol. 46 (2). – P. 176–188. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.001.
17. Dimla D.E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2000. – Vol. 40 (8). – P.



## Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Ensuring hole shape accuracy in finish machining using boring

Vadim Stelmakov<sup>a, \*</sup>, Mikhail Gimadeev<sup>b</sup>, Aleksandr Nikitenko<sup>c</sup>

Pacific National University, 136 Tihoockeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-2763-1956>,  009062@togudv.ru; <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6685-519X>,  009063@togudv.ru;

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4729-5558>,  005392@togudv.ru

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 02 February 2025

Revised: 25 February 2025

Accepted: 27 March 2025

Available online: 15 June 2025

##### Keywords:

Shape accuracy

Radial displacement

cut layer area

4. Bakhno A.L., Yamnikov A.S., Vasilyev A.S., Chuprikov A.O. Povyshenie tochnosti rastachivaniya otverstii v svarnykh korpusakh [More precise reaming of holes in welded components]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2019, no. 6, pp. 38–40. (In Russian).
5. Du W., Wang L., Shao Y. A semi-analytical dynamics method for spindle radial throw in boring process. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 96, pp. 110–124. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.047.
6. Stelmakov V.A., Gimadeev M.R., Iakuba D.D. Research on the process of forming cylindrical surfaces of holes during milling finish with end mills using a circular interpolation strategy. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 2. Cham, Springer, 2021, pp. 917–925. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9\_106.
7. Cao H., Li B., Li Y., Kang T., Chen X. Model-based error motion prediction and fit clearance optimization for machine tool spindles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 133, p. 106252. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106252.
8. Chen Y., Zhao X., Gao W., Hu G., Zhang S., Zhang D. A novel multi-probe method for separating spindle radial error from artifact roundness error. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 93, pp. 623–634. DOI: 10.1007/s00170-017-0533-5.
9. Gokulu T., Defant F., Albertelli P. Stability analysis of multi-insert rotating boring bar with stiffness variation. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, vol. 586, p. 118497. DOI: 10.1016/j.jsv.2024.118497.
10. Liu T.I., Kumagai A., Wang Y.C., Song S.D., Fu Z., Lee J. On-line monitoring of boring tools for control of boring operations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, vol. 26, pp. 230–239. DOI: 10.1016/j.rcim.2009.11.002.
11. Liu Z., Lang Z.Q., Gui Y., Zhu Y.P., Laalej H. Digital twin-based anomaly detection for real-time tool condition monitoring in machining. *Journal of Manufacturing Systems*, 2024, vol. 75, pp. 163–173. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.06.004.
12. Zheng Y., Hu C., Wang M., Wu Z., Zhang J., Xu J. A novel design for double-bending elliptical vibration boring device and its performance evaluation. *Ultrasonics*, 2025, vol. 149, p. 107584. DOI: 10.1016/j.ultras.2025.107584.
13. Li L., Ren Y., Shen Z., Lu J., Tong L. Nonlinear system optimization of cutting tools with dynamic vibration absorbers in deep hole boring: a stability analysis. *Alexandria Engineering Journal*, 2025, vol. 112, pp. 246–253. DOI: 10.1016/j.aej.2024.10.113.
14. Xiao W., Zi Y., Chen B., Li B., He Z. A novel approach to machining condition monitoring of deep hole boring. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, vol. 77, pp. 27–33. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.10.009.
15. Elerian F.A., Helal W.M.K., AbouEleaz M.A. Methods of roundness measurement: an experimental comparative study. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2021, vol. 44 (9), pp. 173–183. DOI: 10.13140/RG.2.2.18930.43206.
16. Lee D.E., Hwang I., Valente C.M., Oliveira J.F.G., Dornfeld D.A. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46 (2), pp. 176–188. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.001.
17. Dimla D.E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40 (8), pp. 1073–1098. DOI: 10.1016/S0