

УДК 621.91.01

Е.Р. Перевозник, В.К. Фролов

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

К вопросу об устойчивости длинномерных инструментальных оправок

На сегодняшний день в машиностроении наблюдается существенное увеличение объема работ по обработке глубоких отверстий, к которым предъявляются высокие требования по точности и качеству обработанной поверхности.

Проблема обработки глубоких и точных отверстий представляет большой интерес для многих отраслей машиностроения. Из них можно отметить производство гидро- и пневмоаппаратуры, энергетическое машиностроение, производство газотурбинных двигателей.

Особенности обработки глубоких отверстий – недостаточная жёсткость инструмента и высокая склонность к упругим деформациям под действием сил резания. С увеличением длины отверстия сложность обеспечения высокой производительности и необходимой точности поверхности резко возрастает. Как следствие, из всех цилиндрических поверхностей деталей разного назначения, которые используются в машиностроении, самыми трудоемкими и сложными в обработке являются глубокие отверстия [1].

Главная задача технологической подготовки производства – обеспечение достижения заданных параметров точности и качества изделия (детали) при наименьших затратах.

Суммарная погрешность обработки возникает в результате комплексного влияния большого количества факторов: погрешности установки заготовки на станке, упругих деформаций элементов ТОС (технологической обрабатывающей системы), возникающих под действием сил резания, износа режущего инструмента и т. д.

Элементарные погрешности обработки должны прогнозироваться и минимизироваться на этапе проектирования технологического процесса.

Обработка глубоких отверстий может, в частности, выполняться растачиванием или шлифованием.

При растачивании и внутреннем шлифовании режущий инструмент традиционно крепится на свободном конце инструментальной оправки, которая склонна к линейным деформациям из-за недостаточной жёсткости, особенно при обработке глубоких отверстий.

Целью данной работы является системное исследование влияния сил, действующих на инструментальную оправку и приводящих к уменьшению точности обработки глубоких отверстий.

Из-за консольного крепления инструмента во время растачивания и шлифования отверстий на точность обрабатываемых поверхностей будут влиять следующие силы:

- вес и сила инерции инструмента;
- вес инструментальной оправки;
- центробежные силы инерции, которые действуют на инструментальную оправку.

Значительная доля деформации инструментальной оправки возникает также под действием радиальной составляющей силы резания.

Сила резания и силы инерции зависят от режимов резания, характеризуются быстрыми изменениями во времени, поэтому они являются динамическими нагрузками на ТОС. Вес инструмента и вес инструментальной оправки – статические нагрузки.

В данной работе анализируется влияние каждой из перечисленных сил на точность обработки отверстий. Принимается, что инструментальная оправка имеет цилиндрическую форму и изготовлена из легированной стали (модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, плотность материала $\rho = 7800$ кг/м³).

Влияние радиальной составляющей силы резания на точность обрабатываемых отверстий исследовано достаточно полно [2, 3].

На рис. 1 представлено схематическое изображение инструментальной оправки длиной L в виде консольной балки с линейной деформацией y_{Py} , которая вызвана действием радиальной составляющей силы резания P_y .

Максимальная линейная деформация оправки y_{Py} определяется по известной формуле:

$$y_{Py} = \frac{P_y \cdot L^3}{3EI}, \quad (1)$$

где I – момент инерции поперечного сечения, м^4 (для круглого сечения $I = \pi \cdot D^4/64$); D – диаметр оправки, м.

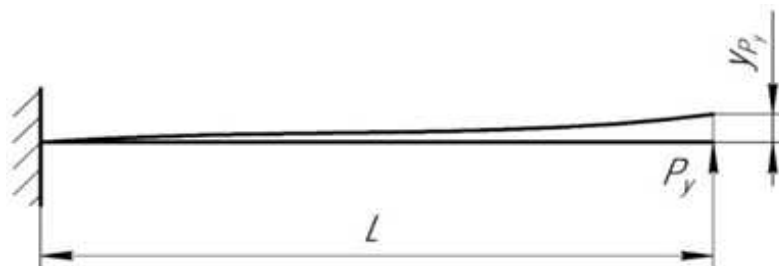


Рис. 1. Схематическое изображение инструментальной оправки в виде консольной балки

Схематическое изображение инструментальной оправки, на которую действуют собственный вес и силы инерции, представлено на рис. 2. Здесь Q_0 – вес инструмента, Н; $Q_{ин}$ – центробежная сила инерции, которая действует на инструмент, Н; q_0 – распределенный вес инструментальной оправки, Н/м; $q_{ин}$ – распределенная центробежная сила инерции, которая действует на оправку, Н/м; L – длина инструментальной оправки, м.

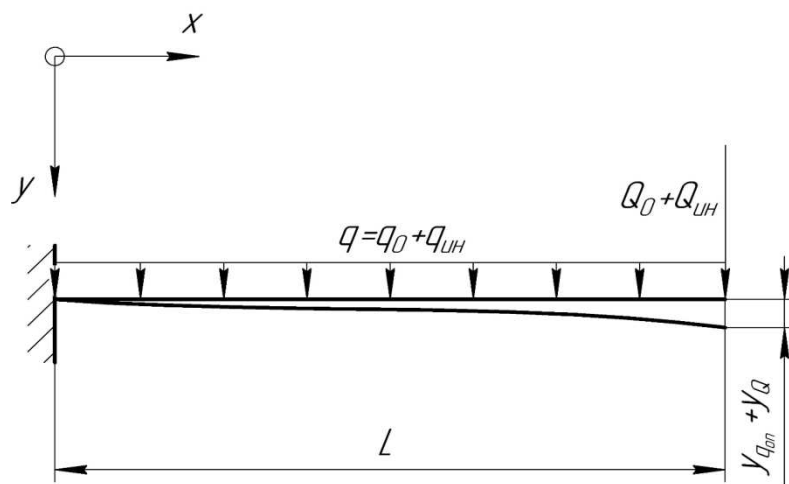


Рис. 2. Схематическое изображение инструментальной оправки в виде консольной балки

Максимальная линейная деформация инструментальной оправки с инструментом, которая возникает под действием собственного веса инструмента и сил инерции, которые действуют на инструмент, рассчитывается по формуле:

$$y_Q = \frac{Q_0 \cdot L^3}{3EI} \left(1 + \omega^2 \cdot \frac{L^3}{3EI} \right), \quad (2)$$

где $\omega = \pi \cdot n/30$ – угловая скорость вращения оправки, рад./с.; n – частота вращения оправки, об./мин.

График зависимости линейной деформации оправки y_Q от частоты вращения оправки n при длине оправки $L = 300$ мм и диаметре оправки D представлен на рис. 3.

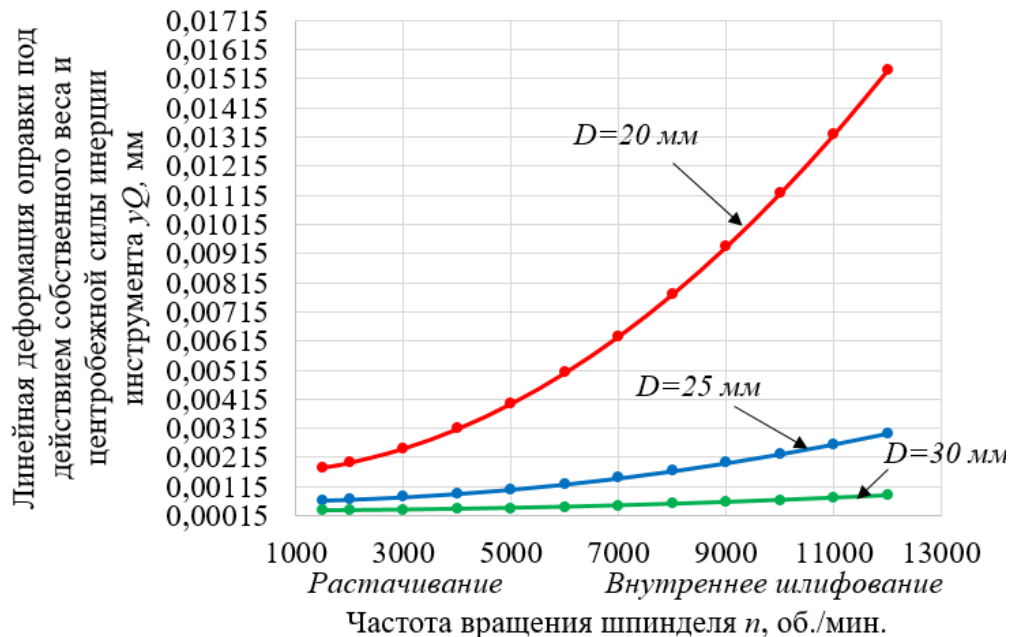


Рис. 3. Зависимость линейной деформации оправки y_Q от частоты вращения оправки n при длине оправки $L = 300$ мм и диаметре оправки D

На величину линейной деформации оправки оказывает влияние собственный вес оправки. Очевидно, что вес равномерно распределен по всей ее длине. Принимается, что нагрузка – линейно-распределенная, а оправка – однородная.

Наличие линейной деформации, которая возникает под действием веса оправки, обуславливает наличие центробежных сил инерции. В свою очередь, силы инерции вызывают дополнительную деформацию оправки. Величина центробежной силы инерции $q_{ин}$, которая действует на оправку, будет меняться по длине (рис. 2). Ее можно представить как функцию от переменной y , где y – величина деформации оправки, которая в свою очередь зависит от длины x .

Интенсивность распределенной нагрузки от веса оправки составляет $q_0 = (\pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot g)/4$, Н/м, а силы инерции, действующие на оправку, $q_{ин} = [\pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot y(x)]/4$, Н/м (g – ускорение свободного падения, Н/кг).

Для определения линейных деформаций $y_{q_{оп}}$ используется дифференциальное уравнение изогнутой оси балки 4-го порядка с учетом собственного веса оправки и центробежных сил инерции:

$$EIy^{IV}(x) = q_0 + q_{ин}(y(x)), \quad (3)$$

Из выражения (3) получаем общее неоднородное дифференциальное уравнение 4-го порядка:

$$y^{IV}(x) - \frac{q_{ин}(y)}{EI} = \frac{q_0}{EI}. \quad (4)$$

Его общее решение имеет вид:

$$y(x) = C_1 \cdot \sin kx + C_2 \cdot \cos kx + C_3 \cdot e^{kx} + C_4 \cdot e^{-kx} - \frac{b}{k^4}, \quad (5)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные коэффициенты, которые возникают в ходе решения дифференциального уравнения при введении начальных условий; $k = \pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \omega^2 / (4 \cdot E \cdot I)$ и $b = \pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot g / (4 \cdot E \cdot I)$ – коэффициенты, введенные для удобства поиска решения.

С использованием уравнения (4) были проведены расчеты в программном обеспечении Mathcad, результаты которых для оправки длиной $L = 300$ мм представлены на рис. 4.

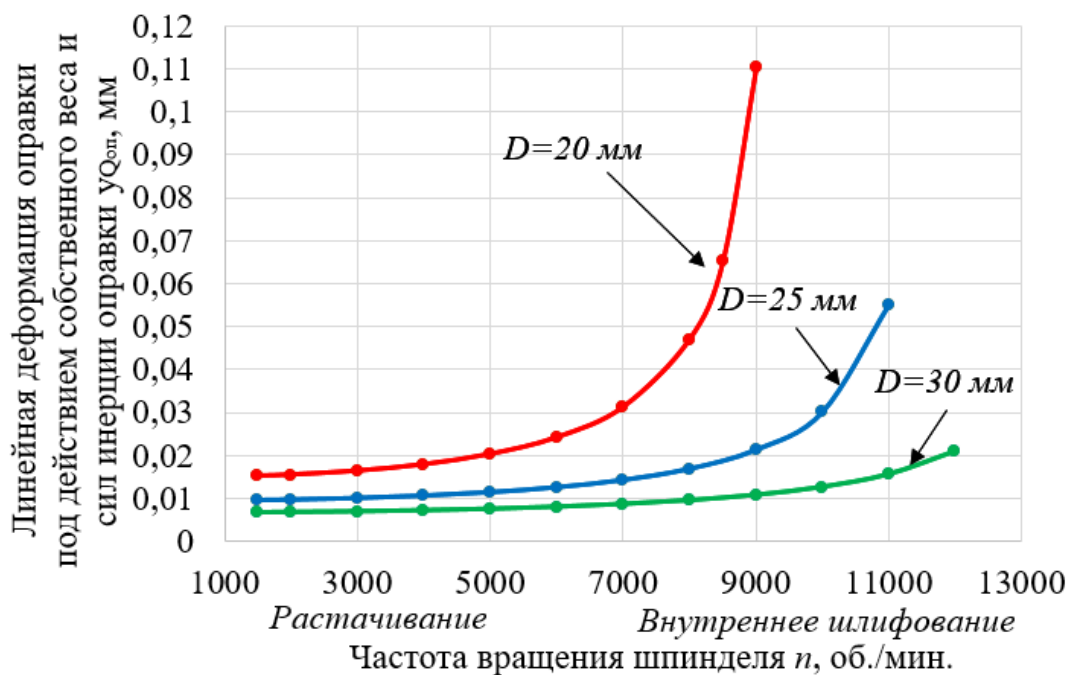


Рис. 4. Зависимость линейной деформации оправки $y_{Q_{оп}}$ под действием собственного веса и сил инерции от частоты вращения оправки n при длине оправки $L = 300$ мм и диаметре оправки D

Результаты влияния всех сил, действующих на инструментальную оправку, сведены в таблицу 1 и представлены в виде диаграмм (рис. 5). Исходные данные для расчетов: длина инструментальной оправки $L = 300$ мм; диаметр оправки $D = 20$ мм; частоты вращения шпинделя $n = 2000$ об./мин. и $n = 9500$ об./мин.; масса инструмента $m_{\text{инстр.}} = 30$ г; радиальная составляющая силы резания $P_y = 10$ Н.

Таблица 1. Линейные деформации инструментальной оправки

Сила, которая действует на ТОС	Значение максимальной линейной деформации оправки y под влиянием данной силы, мм	
	$n = 2000$ об./мин.	$n = 9500$ об./мин.
Радиальная составляющая силы резания	$y_{P_y} = 0,05457$	$y_{P_y} = 0,05457$
Вес и сила инерции инструмента	$y_Q = 0,00199$	$y_Q = 0,01028$
Вес оправки и сила инерции оправки	$y_{q_{\text{оп}}} = 0,01542$	$y_{q_{\text{оп}}} = 0,4088$

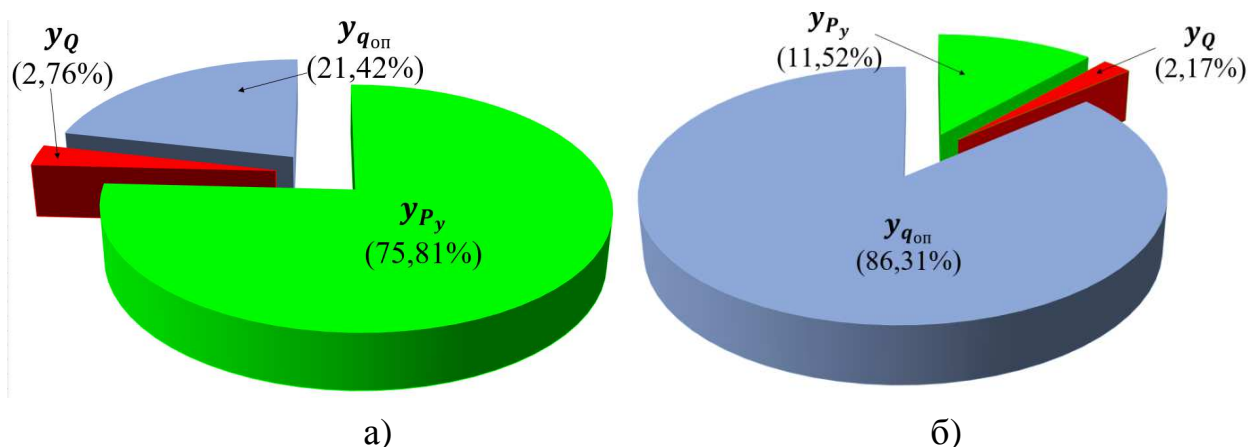


Рис. 5. Диаграмма распределения линейных деформаций оправки, которые возникают под действием статических и динамических нагрузок ТОС:

- а) – при частоте вращения шпинделя $n = 2000$ об./мин.;
 б) – при частоте вращения шпинделя $n = 9500$ об./мин.

Выводы

1. В результате исследований установлено влияние сил, действующих на инструментальную оправку и приводящих к уменьшению точности при растачивании и шлифовании глубоких отверстий.

2. При низких частотах вращения ($n = 2000$ об./мин.) большая доля линейной деформации (около 76% суммарной) возникает под влиянием радиальной составляющей силы резания. Вес оправки и сила инерции, которые действуют на оправку, также приводят к линейной деформации, но их влияние меньше (линейная деформация составляет примерно 21% суммарной). Меньше 3% суммарной линейной деформации вызывают вес и сила инерции инструмента.

3. При увеличении частоты вращения шпинделя до $n = 9500$ об./мин. (такие частоты вращения характерны для внутреннего шлифования) соотношение линейных деформаций от разных типов нагрузок резко меняется за счет увеличения доли деформации под влиянием сил инерций. Линейная деформация, возникающая под влиянием радиальной составляющей силы резания, составляет порядка 12% суммарной. Вес оправки и сила инерции, которые действуют на оправку, приводят к линейной деформации, составляющей 86% суммарной. Около 2% суммарной линейной деформации вызывают вес и сила инерции инструмента.

4. При соотношении длины оправки к её диаметру, составляющему более 15-ти, наблюдается потеря устойчивости оправки при частотах вращения $n > 10000$ об./мин. Чем меньше это соотношение, тем больше должна быть частота вращения, при которой происходит потеря устойчивости оправки.

Авторами планируются дальнейшие исследования устойчивости длинномерных инструментальных оправок с использованием теории механики стержней.

Список использованных источников

1. Отений Я.Н. Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: монография / Отений Я.Н., Смольников Н.Я., Ольштынский Н.В.; ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2003. – 132 с.

2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2003. – 912 с.

3. Корсаков В.С. Точность механической обработки. М.: Машгиз, 1961. – 380 с.