

трудов кафедры «Прикладная механика» МИП. М. 1994. с. 104-107.

7. Сухомлинов Л.Г., Энгельсберг В.К. Конечноэлементная система автоматизированного расчета напряженно-деформированного состояния тонких оболочек в процессах осесимметричного формоизменения под действием жестких штампов. // Известия вузов. Машиностроение. 1989. № 3. с. 66-71.
8. Sukhomlinov L.G., Engelsberg V.K., Davydov V.N. A finite element membrane model for the analysis of axisymmetric sheet metal forming processes. // Int. J. Mech. Sci. 1992. V. 34. № 3. P. 179-193.

### **Оценка безотказности токарных станков с ЧПУ по параметрам точности обработки**

к.т.н. доц. Авдеев В.Б.  
Университет машиностроения  
8 (495) 223-05-23, [assi@mami.ru](mailto:assi@mami.ru)

*Аннотация.* В статье рассмотрен метод определения точностной надёжности токарных станков с ЧПУ с учётом взаимного влияния процессов, снижающих точность обработки.

*Ключевые слова:* металлообрабатывающие станки, параметрическая надёжность, безотказность.

Для металлорежущих станков наиболее характерны параметрические отказы. Существующие методы оценки параметрической надёжности экспериментальным путём можно разбить на две группы: статистические методы и методы, исследующие формирование отказа на основе анализа физической картины его возникновения. Трудность применения статистических методов связана с необходимостью иметь большое количество объектов испытаний и длительностью испытаний. В связи с этим распространение получила вторая группа методов, общая методология которых разработана проф. А.С. Прониковым [1]. Применение данного подхода к конкретному типу оборудования требует дополнительных разработок и исследований с учётом конструкции и условий эксплуатации станков этого типа.

Важным при оценке надёжности станка является выбор параметра, по которому будет оцениваться уровень надёжности. Наиболее полно характеризовать качество станка может точность обрабатываемых деталей. Выбор этого критерия качества обуславливает комплексный подход к оценке надёжности, под которым понимается, во-первых, рассмотрение технологической системы как единого целого, т.е. учёт влияния на точность деталей не только станка, но и приспособления, инструмента, детали; во-вторых, рассмотрение одновременного воздействия на формирование точности всех процессов и явлений, возникающих при работе станка. Комплексность метода требует и позволяет учесть взаимное влияние процессов, протекающих в различных элементах технологической системы.

Целью данной работы является разработка метода определения безотказности станков токарной группы с ЧПУ по параметрам точности обрабатываемых деталей с учетом взаимного влияния ухудшающих точность процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- а) определить, как происходит формирование точности обработки на станке данной конструкции и как точность изменяется во времени;
- б) составить математическую модель, описывающую процесс изменения точности во времени;
- в) проверить степень адекватности модели и реального процесса обработки деталей на станке;
- г) произвести оценку надёжности станка по выбранному параметру.

В качестве объекта исследования взят станок с ЧПУ токарной группы среднего типоразмера. Поскольку исследование станка во всём диапазоне технологических возможностей

является сложным, для проведения исследований предусматривается выбор типовой детали. Типовая деталь является результатом статистических исследований, проведённых по номенклатуре деталей, обрабатываемых на испытуемом или аналогичном оборудовании. Исследования включают сбор информации о конфигурации деталей, размерах, материале, точности, технологии обработки. В итоге была выбрана типовая деталь – ступенчатый валик, материал – сталь 30, точность размеров – по 10 квалитету.

Выходным параметром, по которому определялась надежность станка, взят размер вдоль оси детали. Под отказом в этом случае будем понимать событие, заключающееся в том, что размер обрабатываемых деталей выходит за пределы поля допуска. Оценка безотказности производится за межналадочный период работы станка (4 часа).

На первом этапе работы для анализа механизма образования погрешности обработки и ее изменения во времени был установлен перечень источников элементарных погрешностей механизмов станка, которые формируют погрешность обработки деталей и разработана структурная схема определения точностной надежности (рисунок 1).

Предварительные эксперименты определили доминирующее воздействие (не менее 1 мкм) на точность осевых размеров следующих факторов:  $\Delta_1$  – погрешность траектории движения поперечных салазок относительно оси вращения шпинделя;  $\Delta_2$  – погрешность автоматической смены инструмента;  $\Delta_3$  – погрешность позиционирования суппорта ( $\Delta_3^I$  – систематическая погрешность отработки запрограммированных перемещений,  $\Delta_3^{II}$  – погрешность повторяемости позиционирования);  $\Delta_4(t)$  – упругие отжатия суппортной группы с инструментом;  $\Delta_5(t)$  – тепловые деформации шпиндельного узла;  $\Delta_6(t)$  – смещение во времени нулевого положения суппорта (дрейф "0");  $\Delta_7$  – погрешность установки заготовки в патроне;  $\Delta_8(t)$  – тепловые деформации деталей;  $\Delta_9(t)$  – размерный износ инструмента;  $\Delta_{10}$  – погрешность наладки инструмента на размер.



**Рисунок 1 – Структурная схема определения точностной надежности токарного станка с ЧПУ по параметру точности осевых размеров деталей**

Основной задачей структурной схемы является установление закономерностей формирования точности обработки. В структурной схеме надежности выделяется три уровня связей: во-первых, факторы, определяющие точность станка в статическом состоянии; во-вторых, два вида процессов различной скорости протекания, влияющие на изменение статической точности станка.

Анализ структурной схемы определяет влияние отдельных элементов и устройств станка на точность размеров обрабатываемых деталей и указывает рациональные пути исследований по оценке надежности.

На основе проведённого анализа составлены схемы влияния погрешностей станка на точность обработки. В соответствии с этими воззрениями были изготовлены измерительные

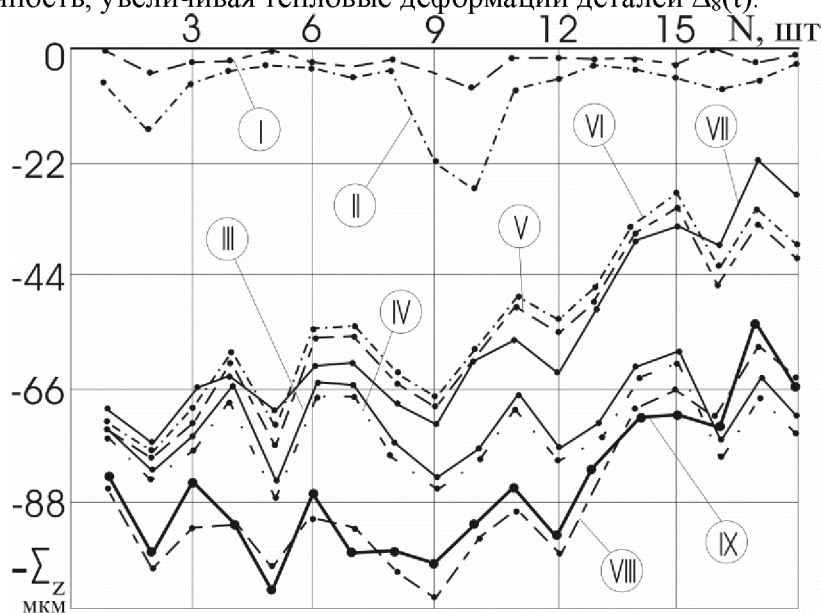
устройства, выбраны измерительные средства, которые обеспечивали получение данных с погрешностью не более 2 мкм.

В качестве критерия правильности представления о процессе формирования суммарной погрешности было взято равенство величин погрешностей, полученных путем измерения обработанных деталей и определенных путём суммирования элементарных погрешностей. Полного равенства добиться практически трудно, так как существуют неучтённые погрешности, по отдельности влияющие мало на точность (менее 1 мкм), а также имеются погрешности, вносимые измерительными средствами и методами измерения. За предельное значение была взята относительная погрешность величиной 10%.

Для того чтобы удостовериться в правильности представления закономерностей образования погрешности размера вдоль оси, была проведена проверка. Для этого обрабатывалась партия заготовок типовой детали из  $N = 18$  штук. На станке были измерены различные составляющие (I ÷ УП) (рисунок 2). Составляющие суммировались, в результате получена кривая УШ =  $\sum Z^I$ .

После обработки деталей и их остывания детали измерялись. Результаты этих измерений представлены кривой IX =  $\sum Z$ . Разница между этими кривыми не превышает 10%.

В то же время экспериментальный метод показал, что процессы, изменяющие точность обработки, оказывают влияние друг на друга, и при этом интенсивность их действия на погрешность обработки не аналогична раздельному действию. Структурная схема надёжности (рисунок 1) учитывает этот факт. Так, износ чистового инструмента  $\Delta_9(t)$  обуславливает рост силы резания, что увеличивает упругие отжатия суппорта  $\Delta_4(t)$ . Расширение детали  $\Delta_8(t)$  при нагреве во времени чернового резания увеличивает силы её закрепления и вызывает дополнительное смещение заготовки  $\Delta_7(t)$  относительно патрона. Износ чернового резца  $U(t)$  и нагрев СОЖ  $\tau(t)$  прямо не оказывают влияния на точность обработки деталей, однако они воздействуют на точность, увеличивая тепловые деформации деталей  $\Delta_8(t)$ .



**Рисунок 2 – Схема формирования погрешности осевых размеров деталей в течение межналадочного периода работы станка: I =  $-\Delta_7^I$  - погрешность установки заготовки ввиду отклонения от перпендикулярности торца патрона оси вращения шпинделя; II = I -  $\Delta_7^{II}$ , где  $\Delta_7^{II}$  - погрешность постановки заготовки в патрон перед закреплением; III = II -  $\Delta_7^{III}$ , где  $\Delta_7^{III}$  - выталкивание заготовки при закреплении; IV = III -  $\Delta_8(t)$ ; V = IV +  $\Delta_9(t)$ ; VI = V +  $\Delta_4(t)$ ; VII = VI ± [ $\Delta_3 + \Delta_6(t)$ ]; VIII = VII -  $\Delta_5(t) = \sum Z^I$ ; IX =  $\sum Z$**

В отличие от предыдущей проверки, когда производилась одновременная оценка всех погрешностей параллельно с обработкой деталей, накопление данных о составляющих погрешностях при оценке надёжности станка предусматривает, как правило, последовательный метод. Поэтому стоит вопрос учета взаимного влияния процессов, а для этого разработки

расчетных зависимостей между взаимосвязанными процессами. Расчетная формула, описывающая взаимосвязь процессов упругих отжатий суппортной группы с инструментом  $\Delta_4(t)$  и износа чистового инструмента  $\Delta_9(t)$ , позволяет при наличии данных о составляющих правой части формулы произвести расчет процесса  $\Delta_4(t)$  в любой момент межналадочного периода  $T_0$  работы станка:

$$\Delta_4(t) = (1/j_C) \cdot P_Z \cdot [1 + r \cdot h \cdot \Delta_9(t)], \quad (1)$$

где:  $j_C$  – жёсткость суппортной группы с инструментом;

$P_Z$  – осевая составляющая силы резания при вновь заточенном резце;

$r$  – коэффициент взаимосвязи износа инструмента и изменения силы резания;

$h$  – коэффициент пересчёта размерного износа резца в износ по задней грани.

Расчётная зависимость, определяющая взаимосвязь процесса  $\Delta_7(t)$  и тепловых деформаций деталей  $\Delta_8(t)$ , описывает изменение воздействия приспособления на точность в течение периода  $T_0$ :

$$\Delta_7(t) = p \cdot \Delta_8(t), \quad (2)$$

где:  $p$  – коэффициент, характеризующий жёсткость патрона.

Каждая обработанная заготовка нагревается по-разному, причем этот процесс имеет тенденцию роста во времени. Тепловые удлинения деталей вдоль оси можно определить следующим образом:

$$\Delta_8(t) = (P_Y \cdot V \cdot \ell / S) \cdot [1 + a \cdot U(t)] \cdot (\eta / c \cdot m) \cdot \alpha \cdot Z \cdot [1 - d + b \cdot \tau(t)], \quad (3)$$

где:  $P_Y$  – вертикальная составляющая силы резания при вновь заточенном резце;

$V$  – скорость резания;

$\ell$  – длина прохода;

$S$  – подача;

$a$  – коэффициент взаимосвязи износа резца и роста силы резания;

$\eta$  – коэффициент, определяющий долю тепла, получаемую деталью при резании;

$c, \alpha$  – удельная теплоёмкость и коэффициент линейного расширения материала детали;

$m, Z$  – масса и размер детали;

$d$  – коэффициент, определяющий долю тепла, отнимаемого у детали СОЖ, патроном, окружающей средой в первоначальный момент;

$b$  – коэффициент, характеризующий действие нагрева СОЖ на количество тепла, отнимаемое у детали.

Существует два пути применения приведенных расчетных зависимостей. Первый, когда определены коэффициенты взаимосвязи процессов, имеются конкретные данные о составляющих правых частей формул и необходимо знать конкретные значения процессов  $\Delta_4(t)$ ,  $\Delta_7(t)$  или  $\Delta_8(t)$ .

Второй путь применяется тогда, когда имеется статистическая информация о случайных составляющих правых частей формул. При этом могут быть рассчитаны оценки числовых характеристик: дисперсий и математических ожиданий процессов  $\Delta_4(t)$ ,  $\Delta_7(t)$  или  $\Delta_8(t)$ . Например, если определена жёсткость суппорта  $j_C$  и коэффициенты  $r$  и  $h$ , получены статистическая информация о силе резания  $P_Z$  и износе инструмента  $\Delta_9(t)$ , оценку числовых характеристик упругих отжатий  $\Delta_4(t)$  можно рассчитать по следующим формулам, разработанным на основе зависимости (1) с использованием правил теории вероятностей:

$$M_4(t) = (1 / j_C) \cdot M_{P_Z} \cdot [1 + r \cdot h \cdot t \cdot M_W], \quad (4)$$

$$D_4(t) = (1 / j_C)^2 \cdot [D_{P_Z} + r^2 \cdot h^2 \cdot t^2 \cdot (D_{P_Z} \cdot D_W + M_{P_Z}^2 \cdot D_W + M_W^2 \cdot D_{P_Z})], \quad (5)$$

где:  $M_4$  и  $D_4$ ;  $M_{P_Z}$  и  $D_{P_Z}$ ;  $M_W$  и  $D_W$  – оценки математических ожиданий соответственно упругих отжатий суппорта, силы резания и скорости износа резца;  $t$  – время.

Так как износ инструмента прямопропорционален времени работы станка, для упрощения решения задачи нестационарный случайный процесс  $\Delta_9(t)$  в зависимостях (4), (5) выражен через случайную величину  $W$  – скорость износа и время  $t$ .

$$\Delta_9(t) = t \cdot W. \quad (6)$$

Задача следующего этапа – составление математической модели процесса изменения

точности обработки во времени и от действия фактора случайности. Для решения этой задачи необходимо установить аналитические связи между элементарной погрешностью станка и той погрешностью, которую она вызывает на детали. Для этого составляются расчетные схемы.

Цель математической модели – просуммировать составляющие элементарные погрешности и определить погрешность размеров деталей, т.е. в вероятностном плане рассчитать математическое ожидание  $M_Z(t)$  и дисперсию  $D_Z(t)$  размеров деталей в течение межналадочного периода  $T_0$  работы станка. Для расчета  $M_Z(t)$  и  $D_Z(t)$  достаточно иметь числовые характеристики составляющих факторов: математические ожидания  $M_n(t)$  и дисперсии  $D_n(t)$ . При получении суммы необходимо сложить как зависимые, так и независимые случайные процессы. Принимая, что между зависимыми случайными процессами установлена детерминированная связь, можно складывать их числовые характеристики, используя правила сложения независимых случайных процессов. Разработанная модель имеет вид :

$$M_Z(t) = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \cdot f[\Delta_9(t)] + M_5(t) + M_6(t) + M_7 \cdot f[\Delta_8(t)] + M_8 \cdot f[U(t), \tau(t)] + M_9(t) + M_{10}, \quad (7)$$

$$D_Z(t) = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 \cdot f[\Delta_9(t)] + D_5(t) + D_6(t) + D_7 \cdot f[\Delta_8(t)] + D_8 \cdot f[U(t), \tau(t)] + D_9(t) + D_{10}. \quad (8)$$

Закон распределения размеров на основании центральной предельной теоремы теории вероятностей возможно принять нормальным.

Возможно несколько путей получения данных о составляющих погрешностях:

- а) расчетный метод;
- б) накопление экспериментальных статистических данных;
- в) использование данных ранее проведенных исследований.

В работе используются все три метода по мере целесообразности применения. Объем данных будет зависеть от задач, которые решаются на этом этапе.

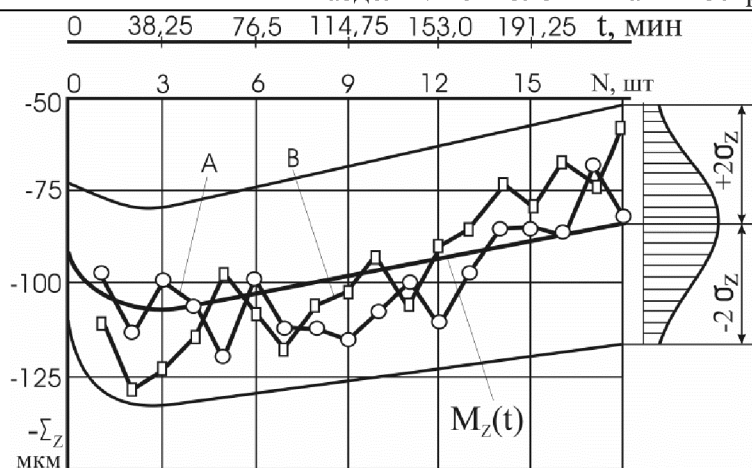
Задачи можно разделить следующим образом:

1. Оценить индивидуальную безотказность станка.
2. Оценить безотказность группы аналогичных станков.

В данной работе определялась индивидуальная безотказность.

Исследование воздействия на точность независимых процессов и явлений проводится по отдельности. Информация о взаимосвязанных процессах получается с учетом их взаимного влияния, т.е. исследуется одновременное воздействие на точность групп процессов, между которыми существует взаимосвязь.

Погрешность траектории движения поперечных салазок относительно оси вращения шпинделя  $\Delta_1$  измерялась с помощью поверочной линейки, измерительной системы модели 212 и записывалась самописцем НЗ38/1. Погрешность автоматической смены инструмента  $\Delta_2$  как случайная величина оценивалась микатором модели ИПМ, установленным в специальное приспособление. Статистические данные о погрешности позиционирования  $\Delta_3$  и дрейфе "0"  $\Delta_6(t)$  получались при измерении точности перемещений суппорта с помощью микроскопа ОМС-6 и стеклянной штриховой меры, погрешность нанесения штрихов на которой  $1 \div 2$  мкм. Данные о тепловых деформациях шпинделя  $\Delta_5(t)$  и размерном износе чистового инструмента  $\Delta_9(t)$  накапливались при обработке нескольких партий деталей. Фактор  $\Delta_5(t)$  измерялся пневматическим бесконтактным преобразователем модели 236, оснащенным реостатным датчиком, и записывался самописцем НЗ020. Фактор  $\Delta_9(t)$  оценивался устройством, оснащенным микатором модели ИПМ. Статистические данные о факторе  $\Delta_7$  накапливались путем измерения погрешности установки заготовок относительно торца патрона микатором модели ИПМ. Расчет оценок числовых характеристик процессов упругих отжатий  $\Delta_4(t)$ , дополнительного выталкивания заготовки из патрона  $\Delta_7(t)$ , тепловых удлинений деталей  $\Delta_8(t)$  производился по разработанным на основе формул (1), (2), (3) зависимостям. Например, для расчёта числовых характеристик процесса  $\Delta_4(t)$  разработаны зависимости (4) и (5). Данные о коэффициентах, определяющих взаимосвязь процессов, и случайных величинах и процессах, входящих в правые части зависимостей, получались экспериментально. Погрешность наладки инструмента на размер  $\Delta_{10}$  рассчитана на основании литературных данных.



**Рисунок 3 – Диаграммы действительных погрешностей осевых размеров деталей (А, В) и расчётно-экспериментальная область их вероятных значений ( $\sigma_z$  - среднее квадратичное отклонение размеров деталей)**

На основе полученных расчетно-экспериментальных данных были определены числовые характеристики  $M_z(t)$  и  $D_z(t)$ , определяющие вероятную область получения размеров типовых деталей. Были обработаны две партии типовых деталей (рисунок 3). Действительные размеры партии деталей не выходят за пределы области их вероятных значений, характер изменения во времени соответствует расчетно-экспериментальному. Этот факт говорит о том, что модель не противоречит реальному процессу формирования погрешности.

Определение закономерности изменения точности обработки – это часть работы по оценке вероятности безотказной работы. Следующая задача заключается в том, чтобы определить числовое выражение вероятности безотказной работы станка  $P(t)$ . Значение этой величины можно определить по зависимости, предлагаемой для аналогичных расчётов проф. А.С. Прониковым [1]:

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{(X_{\max} - M_X(t))}{\sqrt{D_X(t)}} \right], \quad (9)$$

где:  $\Phi$  – функция Лапласа;

$X_{\max}$  – предельное значение параметра точности;

$M_X(t)$  – математическое ожидание процесса формирования погрешности;

$D_X(t)$  – дисперсия этого процесса.

Используя результаты проделанной работы, можно определить уровень безотказной работы исследуемого станка при обработке типовых деталей. Расчет показывает, что уровень безотказности достаточен для работы станка при производстве типовых деталей по 10 и 11 квалитетам точности размеров вдоль оси. В случае изготовления деталей по 9 квалитету точности уровень безотказности недостаточен и может возникнуть вопрос о повышении этого уровня.

Данная методика дает возможность наметить пути повышения надежности. Причем не только наметить, но и оценить их эффективность, так как результат каждого мероприятия можно проверить при известных закономерностях формирования суммарной погрешности.

Эффективность того или иного мероприятия может быть проверена следующим образом. После реализации конструкторских, эксплуатационных или технологических рекомендаций определяется суммарная погрешность обработки по разработанному методу и делается вывод об изменении уровня надежности станка в ту или иную сторону.

В итоге проведенных исследований можно сделать вывод, что учет взаимного влияния процессов при определении составляющих погрешностей позволяет получить реальную картину формирования точности обработки и, как следствие, достоверно оценить уровень надежности станка.

Используя данную методику можно оценить безотказность группы станков. В этом слу-

чае не изменяется состав данных для оценки безотказности, изменяется их объем.

### Литература

1. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
2. Авдеев В.Б. Диагностирование работоспособности технологического оборудования по качеству выполняемой работы в автомобилестроении. Учебное пособие. М.: ИПК Минавтопрома, 1987. 74с.
3. Авдеев В.Б. Метод оценки параметрической надежности токарных станков с ЧПУ с учетом взаимного влияния ухудшающих точность процессов. Сб. научных трудов «Современные проблемы повышения квалификации и научно-технического прогресса в автомобильной промышленности». М.: НПО «НИИТАвтопром», 1988, с. 66-80.
4. Иванников С.Н., Шандов М.М. Метод определения параметрической надежности шпиндельных узлов. М.: Известия МГТУ «МАМИ». 2012, № 1(13). с. 161-162.

### **Повышение производительности обработки штоков пневмо- и гидроцилиндров за счет усовершенствования устройства для комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием**

к.т.н. доц. Пини Б.Е., д.т.н. проф. Максимов Ю.В., к.т.н. доц. Анкин А.В., Авдеев А.С.  
Университет машиностроения  
8(495)223-05-23, доб. 1451, [assi@mami.ru](mailto:assi@mami.ru)

*Аннотация.* Комбинированная обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием является высокоэффективным процессом изготовления рабочих поверхностей корпусов и штоков пневмо- и гидроцилиндров. В данной статье раскрыты конструкция и принцип действия устройства, усовершенствующего реализацию этого процесса.

*Ключевые слова:* комбинированная обработка, поверхностно пластическое деформирование, штоки и корпуса цилиндров, плавающий многолезцовый блок, корпус головки.

Комбинированная обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием (ППД) используется для обработки отверстий и штоков пневмо- и гидроцилиндров, которые находят широкое применение в качестве исполнительных элементов в различных машинах и устройствах. Эти элементы компактны, имеют системы бесступенчатого регулирования скоростей линейных перемещений, технологичны в изготовлении, ремонтноспособны и долговечны в эксплуатации. Изготавливаются пневмо- и гидроцилиндры в широком диапазоне типоразмеров. По диаметрам отверстий наиболее распространённые типоразмеры цилиндров находятся в диапазоне от 25 до 160 мм с разницей по диаметрам в 5 мм.

Традиционная технология изготовления корпусов и штоков пневмо- и гидроцилиндров достаточно трудоемка, особенно при изготовлении крупногабаритных изделий с большой длиной рабочих поверхностей, которая выбирается исходя из требований к эксплуатации изделия с цилиндрами. При использовании в качестве заготовки горячекатаных прутков обработка наружных поверхностей выполняется в три и более операций, что требует значительных затрат времени и средств. Первой операцией при обработке длинномерных штоков является черновая обточка, необходимая для снятия дефектного поверхностного слоя и уменьшения исходных погрешностей формы и размеров. Затем производится получистовая и чистовая обработка.

Устройства для комбинированной обработки резанием и ППД позволяют снизить трудоемкость обработки за счёт совмещения получистовой и чистовой обработки. При этом благодаря использованию процесса обкатывания роликами обрабатываемой поверхности, обеспечивается высокое качество по шероховатости поверхности от  $Ra = 0,63$  и ниже, создаётся упрочнённый слой, улучшающий эксплуатационные свойства деталей.