

УДК 658.58; 658.523

**Н. С. Масляков**, аспирант,

Научный руководитель: **М. С. Островский**, д.т.н., проф., Московский государственный горный университет

E-mail: [kaftmr@msmu.ru](mailto:kaftmr@msmu.ru)

## **Механизация и автоматизация механической обработки в ремонтном производстве**

*Рассмотрен принцип работы интерактивной компьютерной системы управления универсальными станками, произведён выбор математической модели процесса управления точностью технологического процесса и обоснован выбор метода компенсации погрешностей, вызванных упругими деформациями технологической системы.*

**Ключевые слова:** интерактивная компьютерная система управления, универсальное станочное оборудование, ремонтное производство, активный контроль.

**N. S. Maslyakov, M. S. Ostrovskiy**

## **Mechanization and Automation Machining in Repair Manufacture**

*By author is considered the principle of work of an interactive computer control system by versatile machines, is chosen mathematical model of management of process by the accuracy of technological process and is proved the method of compensation of the errors caused by elastic deformations of technological system.*

**Keywords:** Interactive computer control system, repair manufacture, versatile machine tools, in-cycle control.

Одним из ключевых факторов эффективной работы горнодобывающих предприятий является возможность самообеспечения парка эксплуатируемых технологических машин и оборудования запасными частями, для поддержания необходимого уровня их надёжности путём проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту. Однако, в большинстве случаев, уровень организации и технического оснащения ремонтных предприятий весьма низок и неспособен удовлетворять существующие потребности в запасных частях. Это выражается в низком качестве выпускаемой продукции, высокой её стоимости, несоблюдении

сроков поставок (производства) и т. д., что делает продукцию ремонтных предприятий неконкурентоспособной.

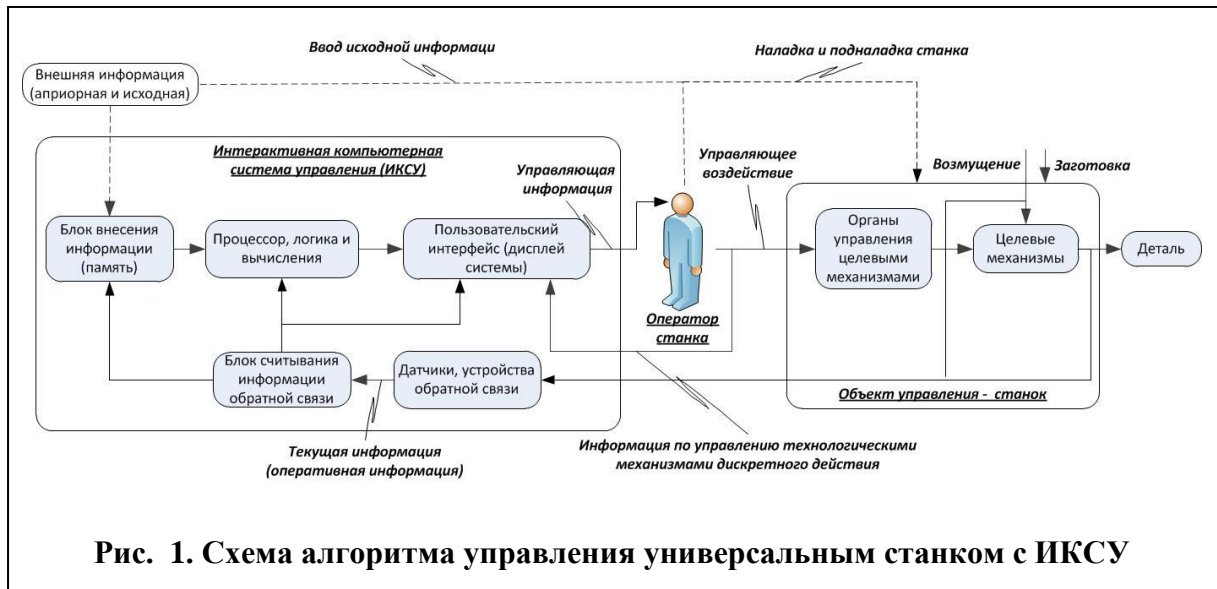
Для снижения себестоимости, повышения производительности, обеспечения стабильного качества и технологической надёжности единичного и мелкосерийного производства запасных частей в условиях дефицита квалифицированных специалистов и низкой надёжности универсального станочного оборудования из-за его морального и физического износа (характерная особенность ремонтных предприятий) необходимо внедрение инновационных решений связанных с повышением эффективности их работы. Одно из таких инновационных решений предложила российская компания ООО «Техстанко-21», разработавшая интерактивную компьютерную систему управления (ИКСУ) универсальными станками «ПроЭмулятор». ПроЭмулятор – это информационно-технологический комплекс, построенный на базе компьютера для визуального контроля на экране монитора и управления универсальными токарными, фрезерными, расточными, шлифовальными и другими станками [6, 9]. По сути, ИКСУ представляет собой совокупность аппаратно-программных средств, которыми оснащается модернизируемый универсальный станок, образуя при этом автоматизированную систему активного контроля процесса обработки деталей. Процесс автоматизированного активного контроля при обработке деталей с применением ИКСУ представляет собой получение измерительной информации и формирование на её основе корректирующих команд оператору для управления технологическим оборудованием.

При оснащении универсального станка ИКСУ, образуется совершенно новая автоматизированная (компьютеризированная) «человеко-машинная» система, состоящая из оператора (рабочего), системы управления – ИКСУ и объекта управления – станка. Характерной особенностью такой системы является то, что оператор сопряжён с технологическими устройствами. При таком взаимодействии окончательное решение по управлению станком принимает сам оператор, а средство автоматизации лишь помогает ему в обосновании правильности его решения.

Процесс управления универсальным станком с ИКСУ выполняется по аналогии, как и на обычным универсальным станком см.

Рис. 1. (оператор «вручную» воздействует на органы управления целевыми механизмами и технологическими узлами дискретного действия станка), за исключением процесса формирования алгоритма управления (управляющей информации). В данной системе управляющая информация формируется не мыслительной деятельностью оператора, а путём считывания из оперативной памяти системы исходной информации (в соответствии с выбранным заданием для обработки), дальнейшей её интерпретацией процессором на основании априорной информации, хранящейся на жёстком диске персонального компьютера (ПК), входящего

в состав ИКСУ. Процессор ПК ИКСУ на основании поступившей в него текущей информации (с датчиков и устройств, образующих обратную связь со станком) и её сравнения с исходной информацией, принимает решения и формирует указания оператору, обслуживающему станок с ИКСУ в понятной для него форме (визуализируя исходные данные и координируя выполняемые им действия). В процессе работы ИКСУ оператор освобождается от необходимости запоминать исходную информацию, продумывать порядок выполнения технологических переходов (что снижает требование к его квалификации).



**Рис. 1. Схема алгоритма управления универсальным станком с ИКСУ**

По сути, ИКСУ используется как вспомогательное средство автоматизирующее синхронизацию исходной и фактической информации, её интерпретацию и демонстрацию оператору в понятной графической форме для оперативного контроля и управления процессом обработки деталей, обеспечивая при этом технологическую надёжность получения требуемых качественных и точностных показателей. Элементы технологической системы взаимно дополняют друг друга своими основными преимуществами: оператор – творческим разумом, умением подходить к решаемым задачам нестандартно; компьютер – способностью быстро запоминать и распознавать, хранить, выполнять вычисления и воспроизводить большие объёмы информации; станок – точное выполнение процессов в соответствии с управляющими взаимодействиями (через органы управления).

В реальных условиях процесс обработки деталей совершается под воздействием многих случайных возмущений, зависящих от факторов, которые приводят к возникновению погрешностей обработки деталей. Процесс управления точностью обработки представляет собой прогнозирование указанных погрешностей, ожидаемых в данный момент времени (или в данном цикле обработки), и во введении коррекции в

положение инструмента на прогнозируемую величину (в тот же момент или перед данным циклом обработки). Выполнение данных процессов осуществляется через соответствующие алгоритмы преобразования, описываемыми математическими моделями рассматриваемых технологических процессов (ТП) [3, 4].

Для построения математической модели действующего или проектируемого ТП необходимо провести исследование и анализ этого процесса или процесса, аналогичного проектируемому, с целью сбора статистических данных (съём реализации) для определения:

- вероятностных характеристик рассеивания отклонений размеров деталей и характера смещения центра рассеивания настройки при обработке деталей (эти характеристики являются исходными данными),
- функциональной связи управляемой координаты объекта с положением центра рассеивания размерной настройки, т.е. передаточной функции объекта (математические модели алгоритмов преобразования).

Прежде чем приступить к определению характеристик процесса, выбирается метод исследования, задаётся точность, с которой необходимо определить характеристики и метод их аппроксимации. Для определения вида характеристик применяют аналитические, а для нахождения числовых значений экспериментальные методы исследования. Выбор метода аппроксимации заключается в правильном выборе гипотезы о характере изменения критерия точности.

В качестве основного критерия точности принимается показатель качества, учитывающий отклонения размера в фиксированном сечении  $\{x_n\}$  (отклонение размера детали от некоторого номинала) величину которого в общем виде можно представить следующей обобщённой математической моделью

$$x_n = x_0 + an + \mu_n + \lambda_n + \xi_n, \quad (1)$$

где  $\mu_n$  – случайная функциональная (коррелированная) составляющая, характеризующая тепловые и силовые деформации СПИД;  $\lambda_n$  – случайная некоррелированная составляющая, характеризующая износ режущего инструмента;  $a$  – равномерное систематическое линейное смещение настройки (тренд), приходящее на одну деталь и  $\xi_n$  – собственно (чисто) случайная составляющая погрешности, характеризующая влияние случайных процессов (колебания припусков и физико-механических свойств заготовок и инструмента).

Все составляющие в уравнении (1), за исключением  $x_0$ , являются управляемыми. Для определения математической модели управления точностью обработки на металлорежущих станках необходимо знать характер смещения настройки при обработке деталей на этих станках. Так как размерная настройка  $\{x_n\}$ , смещаясь от цикла к циклу случайным

образом, образует некоторую случайную последовательность, то требуется подобрать такой теоретический процесс, свойства которого достаточно хорошо совпадали бы со свойствами случайной последовательности  $x_n$ . Это и будет искомая математическая модель.

Для того чтобы определить характеристики качества (размера) необходимо принять правильную гипотезу о характере изменения величины показателя качества т.е. выбрать частный случай уравнения (1) для описания изменения этой величины и найти числовые значения коэффициентов в формуле (1). Гипотеза о возможных математических моделях может быть выдвинута на основании физических представлений о причинах смещения размерной настройки и опыта экспериментальных исследований.

В ремонтном производстве универсальные станки с ИКСУ применяются, как правило, для изготовления запасных частей в единичном и мелкосерийном количестве, постоянное меняющейся номенклатуры. В таких условиях для получения наиболее правдоподобных данных для усреднённого (огрублённого) определения составляющих суммарной погрешности  $\{x_n\}$ , необходимо исследовать ТП комплексных деталей (деталей-представителей), которые наиболее полно будут характеризовать определённые группы деталей (по конструкторским и технологическим признакам). Такой подход, в данном случае применяется не столько с целью определения конкретных значений характеристик погрешностей, сколько для определения доли компенсируемых и некомпенсируемых составляющих суммарной погрешности.

По результатам анализа принципов работы ИКСУ можно сделать следующие выводы, касательно перечня компенсируемых и некомпенсируемых составляющих погрешностей:

- применение преобразователей линейных перемещений позволяет с высокой точностью контролировать текущее положение вершины режущего инструмента в ненагруженном (статичном) состоянии;
- осуществление привязки режущего инструмента при обработке каждой детали позволяет частично компенсировать размерный износ режущего инструмента, полученный им при обработке предыдущих деталей;
- выполнение обработки малого объёма партии постоянно меняющейся номенклатуры деталей оказывает малое влияние на параметр равномерного систематического смещения, приходящегося на одну деталь.

Таким образом, в процессе обработки деталей из представленных в формуле составляющих погрешностей не компенсируются  $\mu_n$  и  $\xi_n$ , а оставшиеся параметры компенсируются частично. Если условно принять, что составляющие  $\lambda_n$  и  $a_n$  компенсируются полностью, то можно

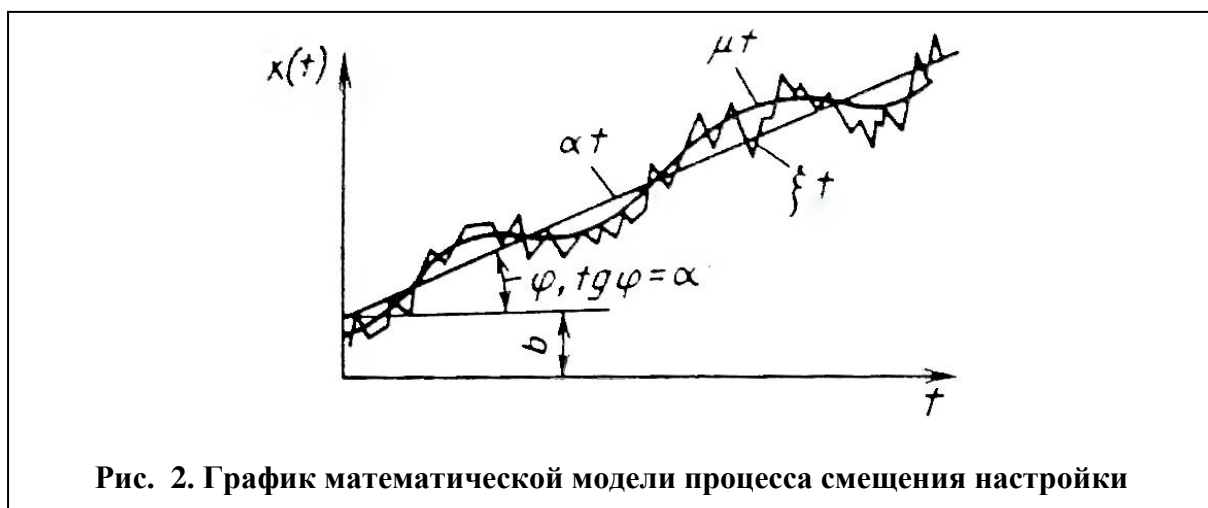
предположить следующую гипотезу, о составе суммарной погрешности обработки, которая описывается следующей формулой

$$x_n = x_0 + \mu_n + \xi_n. \quad (2)$$

Для проверки правильности данной гипотезы, необходимо проанализировать массив данных, полученных в результате проведения экспериментальных исследований.

С учётом перечисленных условий можно предположить, что при обработке деталей на универсальных станках с ИКСУ смещения настройки будет подчиняться математической модели, которую можно описать следующим образом. Процесс смещения настройки представляет собой стационарный случайный процесс, наложенный на неслучайную линейную функцию. Примерный вид одной реализации процесса, характерного для данной модели, приведён на

**Рис. 2** Величина  $b$  – в этой модели определяет положение начальной настройки.



**Рис. 2.** График математической модели процесса смещения настройки

Основными характеристиками данной модели являются:  $a$  – интенсивность неслучайного смещения настройки, приходящаяся на одну деталь (тренд);  $K_\mu(t)$  – корреляционная функция случайной функциональной составляющей;  $\sigma_\xi^2$  – дисперсия собственно случайной составляющей.

Математическое ожидание процесса  $X(t)$ , описанного данной математической моделью есть неслучайная функция  $at$ .

$$M[x(t)] = at. \quad (3)$$

Дисперсия этого процесса

$$D_x = \sigma_x^2 = D_\mu + D_\xi = \sigma_\mu^2 + \sigma_\xi^2 = const. \quad (4)$$

Выбор математической модели осуществляется после предварительного обследования ТП с целью установления степени его

отлаженности, сбора статистических данных (съём реализаций) в условиях действующего производства и их обработки. Математическая модель выбрана на основе анализа изменения дисперсии по сечениям ансамбля реализаций, т.е. некоторой последовательности величин  $D_k$ . Для выбранной модели данная последовательность описывается постоянной величиной  $D_x = \text{const}$  Рис. 3.



Аналитики мы предположили гипотезу о виде математической модели описания процесса смещения настройки при обработке деталей на универсальных станках с ИКСУ. Как было сказано ранее для определения параметров и принятия на основе их значений гипотезы необходимо провести экспериментальное исследование.

Приведенные в работах [2, 7] исследования проводились в условиях стабильного массового и серийного производства. В условиях единичного и мелкосерийного производства процессы получения размеров на токарных станках нельзя отнести к стабильным, так как изменяющиеся условия обработки приводят к изменению характера ТП, закона распределения погрешностей и их параметров. Однако, как было сказано ранее, данную методику можно применить не столько с целью определения точного значения характеристик конкретных ТП, сколько для определения доли компенсируемых и некомпенсируемых погрешностей при определённых условиях обработки комплексных деталей (деталей представителей), для групп, объединённых по конструкторским и технологическим признакам.

Определения статистических характеристик случайных последовательностей,  $\{\mu_n\}$  и  $\{\xi_n\}$  входящих в состав уравнения (2) можно выполнить на основании статистического анализа точечных диаграмм ТП, на основании методики приведённой в работе [2].

Так в работе [7] приведена методика разделения погрешностей обработки на систематические, случайные (некоррелированные). В основу методики положены методы наименьших квадратов и скользящей средней. Критерием качества деления погрешностей служит некоррелированность собственно случайной составляющей.

По результатам проведённого анализа факторов, влияющих на возникновение погрешностей при обработке деталей на универсальных станках с интерактивной компьютерной системой управления (ИКСУ) и экспериментального исследования получена математическая модель (2) управления параметром точности ТП (процессом смещения настройки) и определены числовые величины составляющих, входящих в состав модели.

Выявлено, что одним из доминирующих факторов, влияющих на величину некомпенсируемых ИКСУ погрешностей, являются тепловые и силовые деформации технологической системы, описываемые случайной функциональной коррелируемой последовательностью  $\{\mu_n\}$ , представляющей собой смещение центров мгновенного распределения относительно детерминированного прямолинейного тренда.

Так как при данных условиях в составе корректируемой погрешности доминирует систематическая составляющая, то более эффективным является программная коррекция, осуществляемой по результатам предварительно проведённых измерений корректируемых параметров. Как было сказано ранее, доминирующими факторами, определяющими корректируемые параметры ТП обработки детали на универсальных станках с ИКСУ, являются тепловые и силовые деформации технологической системы.

Компенсацию погрешности обработки, вызванных тепловыми процессами, возникающие в зоне резания можно выполнить путём применения стабильного охлаждения, установления оптимальных режимов резания, выбора соответствующего инструмента, прогрева станка перед обработкой и т. д. Применение соответствующих методов компенсации погрешностей, вызванных тепловыми деформациями системы СПИД являются простыми и наиболее целесообразными методами, для ТП единичного и мелкосерийного изготовления деталей широкой номенклатуры в условиях ремонтного производства.

Компенсация погрешности обработки, вызванных силовыми деформациями технологической системы, в большинстве случаев, связано с качеством сборки, техническим состоянием и кинематической точностью самого станка (системы СПИД). Очевидно, что наибольшей жесткостью обладают новые станки, внедрённые и грамотно эксплуатируемые для выполнения ТП на ремонтных предприятиях. Однако создать абсолютно жёсткую систему СПИД не возможно, можно лишь поддерживать на определённом уровне состояние технологической системы, соответствующее установленными производителями требованиям. Жёсткость станка можно повысить, но для этого необходимо применять специальные дорогостоящие приспособления. Компенсацию упругих деформаций, можно осуществлять путём активного контроля с применением специальных датчиков (электронных динамометров),



измеряющих величину силы резания. Однако их применение не оправдывает себя для уровня точности ТП при изготовлении деталей на универсальных станках с ИКСУ в условиях ремонтного производства (данные системы применяются, как правило, на станках с ЧПУ, в ТП, обеспечивающих повышенной точностью изготовления деталей).

Таким образом, компенсацию погрешностей, вызванных силовыми деформациями системы СПИД несообразно выполнять путём применения программной коррекции упругих перемещений системы СПИД, на основании данных, полученных при экспериментальном определении жёсткости технологической системы на этапе предварительной наладки.

Одним из наиболее активных факторов динамического характера является сила  $P$  резания и ее колебания. Сила резания является функцией ряда факторов, действующих в процессе обработки [1].

$$P = f(v, s, t, HB, C_1, C_2, C_3), \quad (5)$$

где  $v$  – скорость резания;  $s$  – подача;  $t$  – глубина резания;  $HB$  – твёрдость материала обрабатываемой детали;  $C_1$  – геометрия резания;  $C_2$  – состояние режущего инструмента;  $C_3$  – другие факторы.

Значительное влияние на силу резания оказывают глубина  $t$  резания и свойства материала заготовки, характеризующиеся коэффициентом  $k_m$  [5]. Глубина резания определяется припуском на обработку, колебание значений которого является одним из решающих факторов, оказывающих влияние на точность изготавливаемых деталей. Значения припусков и характеристик свойств материалов в технологическом процессе изготовления деталей выступают как случайные величины, а значит и сила резания, являющаяся функцией случайных величин  $t$  и  $k_m$ , также будет случайной величиной.

Связь точности изготовленных деталей с припусками и свойствами материала заготовок сводится к следующему. Значения припуска и характеристик свойств материала заготовки определяют значение силы резания. Наиболее существенное влияние на размер обрабатываемой детали оказывают перемещения звеньев СПИД в направлении, нормальном к обработанной поверхности, которые в основном обусловлены действием силы  $P_y$ .

$$P_y = P_z \lambda = 9,81 \lambda C_p t s^{0,75}, \quad (6)$$

где  $P_z$  – касательная составляющая силы резания, Н;  $t$  – глубина резания, мм;  $s$  – подача, мм/об.,  $\lambda$  и  $C_p$  – коэффициенты, определяемые по нормативным материалам или на основании экспериментальных данных.

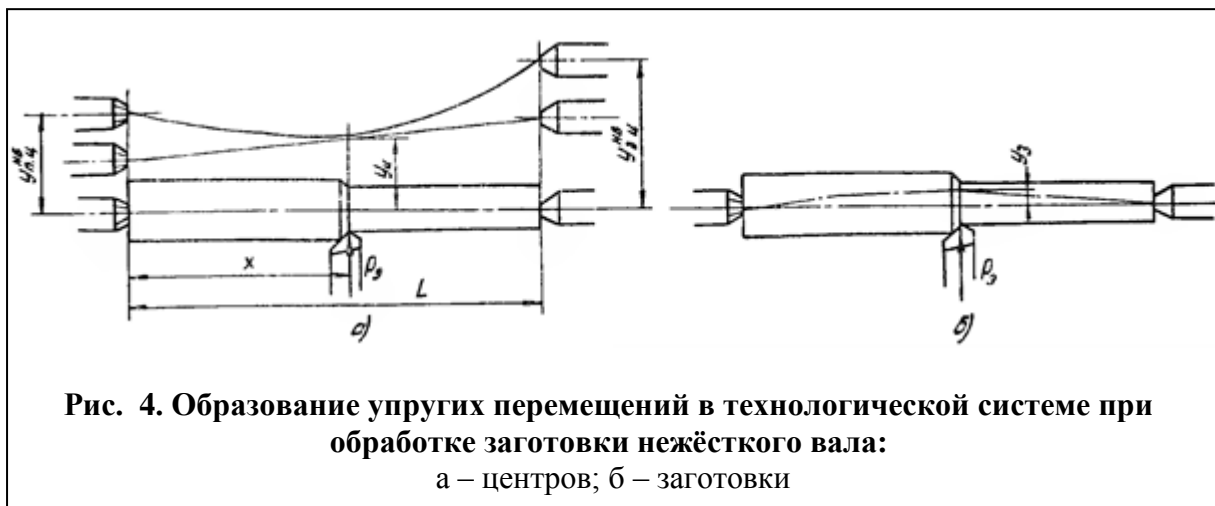
Сила резания через жесткость  $j_{ст}$  технологической системы станка трансформируется в относительное упругое перемещение режущего

инструмента и заготовки, являющееся составной частью погрешности динамической настройки системы и детали.

$$y = \frac{P_y}{J_{ст}} = \frac{9,81 \lambda C_p t s^{0,75}}{J_{ст}} \quad (7)$$

Жесткость  $J_{ст}$  технологической системы во времени не является постоянной величиной. Её значения зависят от многих факторов (одним из основных является нагрев), проявление которых невозможно предвидеть заранее, что позволяет отнести её к разряду случайных величин. Так как с изменением нагрузки жёсткость несколько изменяется, то на практике чаще всего определяют среднюю жёсткость в диапазоне эксплуатируемых нагрузок от нуля до  $P_{y \max}$ .

Неравномерный припуск, снимаемый с поверхности заготовки, неоднородные свойства материала в различных частях заготовки, неодинаковая жесткость технологической системы при обработке заготовки в разных ее сечениях приводят к отклонениям формы обработанной поверхности детали.



При обработке заготовки нежесткого вала (Рис. 4.), установленной в центрах (передний центр рифленый) токарного станка, причинами отклонений формы поверхности вала в продольном сечении будет являться переменная жесткость технологической системы по мере перемещения инструмента от задней к передней бабке станка.

В сечении заготовки, отстоящем от переднего центра на расстоянии  $x$ , упругое перемещение в технологической системе под воздействием эквивалентной силы  $P_3 = P_{y \max}$  складывается из перемещений  $U_{ц} = U_{п.ц.} + U_{з.ц.}$  переднего и заднего центров станка, самой заготовки из-за ее деформации  $U_3$  суппорта  $U_c$  и резца  $U_p$ :

$$U_{сист} = U_{ц} + U_3 + U_c + U_p \quad (8)$$

Упругое перемещение в технологической системе на расстоянии  $x$  от передней бабки

$$y_{\text{сист}} = \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \frac{P_y}{j_{\text{п.ц.}}} + \left(\frac{x}{L}\right)^2 \frac{P_y}{j_{\text{з.ц.}}} + \frac{P_y x^2 (L-x)^2}{3EJL} + \frac{P_y}{j_c} + \frac{P_y}{j_p}, \quad (9)$$

где  $x$  – расстояние от переднего центра;  $L$  – длина вала;  $P_y$  – эквивалентная сила;  $j_{\text{п.ц.}}$  – жёсткость передней бабки, измеренная на переднем центре;  $j_{\text{з.ц.}}$  – жёсткость задней бабки, измеренная на заднем центре;  $E$  – модуль упругости материала заготовки;  $J$  – момент инерции сечения заготовки;  $j_c$  – жёсткость суппорта;  $j_p$  – жёсткость резца.

Существует несколько методов определения жёсткости металлорежущих станков или отдельных узлов. К ним относятся:

1. *статический метод* (испытания на неработающем станке);
2. *производственный метод* (испытания при обработке заготовки);
3. *динамический метод* (испытания в процессе колебания).

Наиболее достоверные данные о жёсткости станка даёт производственный метод, который основан на обработке заготовки с переменным припуском (переменной глубиной резания). Рассмотрим самый простой случай его проведения [5], более полные методы с подробными описаниями исходных данных заготовки, режимов обработки, вывода формул приведены в работе [8].

Производственный метод основан на обработке заготовки с переменным припуском и некоторых расчетах. Для испытания токарного станка, берут достаточно жесткую заготовку, имеющую два пояска диаметрами  $D_1$  и  $D_2$  (

Рис. 5). Пояски обрабатываются за один рабочий ход при неизменных условиях (подаче, скорости и т. д.). Уступ  $\Delta_d = d_1 - d_2$ , образовавшийся вследствие разных глубин резания и отжатый в технологической системе, будет меньше  $\Delta_z = D_1 - D_2$ .

Отношение  $\varepsilon = \Delta_z / \Delta_d$ , называемое уточнением, показывает во сколько раз в результате обработки уменьшилась погрешность заготовки. Уточнение характеризует жесткость технологической системы:

$$j_{\text{ст}} = 9,81\lambda C_p S^{0,75} \varepsilon, \quad (10)$$

где  $\lambda = P_y / P_z$ ;  $S$  - подача, мм/об.

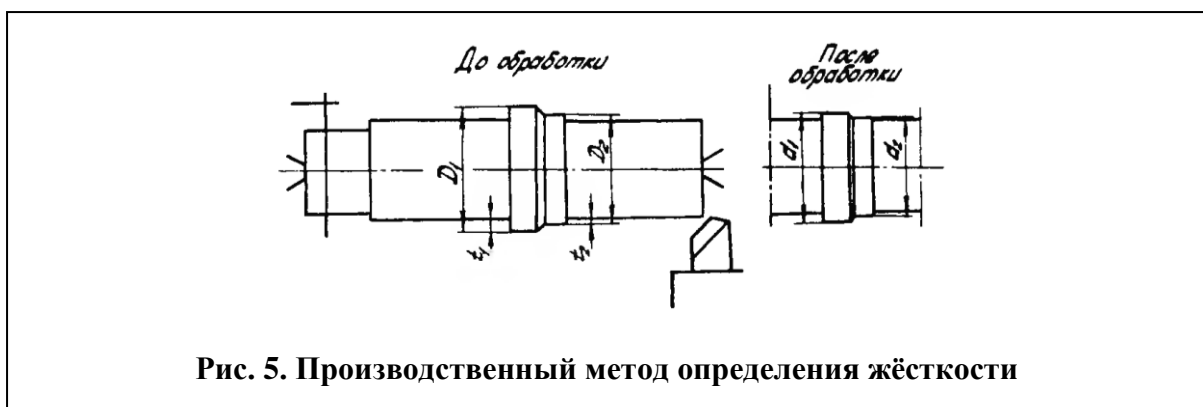


Рис. 5. Производственный метод определения жёсткости

Управление упругими перемещениями может осуществляться одним из трех путей [1]:

1. Ограничением допусками  $T_{пр}$  и  $T_{нв}$  отклонений припусков и твердости заготовок и соблюдение этих отклонений в установленных пределах;

2. Компенсацией возникшего упругого перемещения  $y$  (отклонения  $\Delta A_d$  размера  $A_d$ ) за счёт изменения размера  $A_c$  статической настройки технологической системы на величину  $\Delta A_c$ .

3. Компенсацией возникшего упругого перемещения  $y$  (отклонения  $\Delta A_d$  размера  $A_d$ ) за счёт изменения размера  $A_d$  динамической настройки технологической системы на величину  $\Delta A_d'$ .

Из представленных путей, наиболее простым для реализации (не требует использования специальных датчиков и устройств управления малыми перемещениями) и целесообразным для обеспечения требуемой точности изготовления деталей на универсальных станках в условиях ремонтного производства является первый путь. Смысл данного подхода заключается в следующем.

Расчет допусков  $T_{пр}$  и  $T_{нв}$  выполняется следующим образом. Частью  $T_t$  допуска  $T_A$  на выдерживаемый размер  $A$  ограничивается мгновенное поле  $\omega_t$  рассеяния размеров, а исходя из допуска  $T_t$  ограничиваются допуском  $T_y$  упругие перемещения в технологической системе. Ориентируясь на минимально возможную жесткость технологической системы и минимальный припуск  $z^{min}$ , далее выполняется переход к предельным значениям  $P^{min}$  и  $P^{max}$ :

$$P^{min} = f(z^{min}); \quad (11) \quad y^{min} = P^{min} / j^{min}; \quad (12)$$

$$y^{max} = y^{min} + T_y; \quad (13) \quad P^{max} = y^{max} j^{min}. \quad (14)$$

Имея их значения и используя формулу, определяющую силу резания (6), при выбранных значениях коэффициента  $C_P$ , подачи  $S$ , скорости  $v$  резания, следует перейти к предельным значениям припусков и твердости

