

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА

**ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ  
ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ**

Утверждено  
редакционно-издательским  
советом института  
в качестве  
методических указаний  
к лабораторной работе № 1  
для студентов

Составители: *И. А. Иващенко, Г. В. Смирнов*

С 3

УДК 621.9.62

*Влияние жесткости технологической системы на точность формы обрабатываемой заготовки: Метод. указания/Сост. И. А. Иващенко, Г. В. Смирнов; Куйб. авиац. ин-т, Куйбышев, 1989 — 12 с.*

Методические указания содержат краткое изложение теории жесткости технологической системы, влияния жесткости на погрешность формы обрабатываемой заготовки. Приводятся методика экспериментального исследования влияния жесткости технологической системы на точность формы, валика при его токарной обточке.

Рекомендуется студентам специальности 13.02.

Рецензенты: *К. Ф. Митряев, Д. Д. Паншев*

Цель работы — изучить влияние жесткости технологической системы станок — приспособление — инструмент — заготовка на точность формы заготовки в продольном сечении при обработке ее на токарном станке с закреплением в патроне.

## 1. ЖЕСТКОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Жесткостью технологической системы называют способность этой системы оказывать сопротивление действию деформирующих ее сил. Количественно жесткость  $j$  системы в н/мкм обычно выражают отношением нормальной составляющей  $P_y$  силы резания к суммарному смещению  $y$  лезвия режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки, измеренному в направлении нормали к этой поверхности, т. е.

$$j = P_y / y. \quad (1)$$

При расчете погрешностей обработки, связанных с упругими деформациями системы, удобно пользоваться понятием податливости. Податливость системы (в мкм/н) — величина, обратная жесткости. Численно податливость выражается уравнением

$$W = \frac{1}{j} = \frac{y}{P_y}. \quad (2)$$

Для перевода значений податливости из ранее употреблявшейся системы единиц мкм/кгс в новую и наоборот можно использовать следующие переводные приближенные формулы:

$$W \text{ (мкм/Н)} = 0,1 W \text{ (мкм/кгс)}, \quad (3)$$

$$W \text{ (мкм/кгс)} = 10 W \text{ (мкм/Н)}. \quad (4)$$

Хотя в уравнениях (1) и (2) при определении жесткости  $j$  и податливости  $W$  учитывается действие только нормальной составляющей силы резания  $P_y$ , в действительности на величину деформации системы влияют также тангенциальная  $P_z$  и осевая  $P_x$  составляющие. Это учитывается тем, что при экспериментальном определении жесткости система нагружается не одной силой  $P_y$ , а силами  $P_z$  и  $P_y$ . При определении  $j$  для случая закрепления заготовок типа дисков система нагружается силами  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$ . Соотно-

шение их выбирают таким, какое реально возникает при резании (обычно  $P_z : P_H : P_A = 1 : 0,6 : 0,4$ ).

Жесткость технологической системы зависит от способа закрепления заготовки, ее размеров, жесткости узлов станка (для токарного станка — шпинделя, суппорта, задней бабки), жесткости приспособления и инструмента. Для случая обтачивания заготовки — валика на токарном станке с консольным закреплением в патроне (рис. 1) податливость  $W^l$  системы на расстоянии  $l$  от места приложения силы резания до торца кулачков будет равна

$$W^l = W_c + W_{\text{шп}}^l + W_n^l + W_{\text{заг}}^l, \quad (5)$$

где  $W_c$ ,  $W_{\text{шп}}^l$ ,  $W_n^l$ ,  $W_{\text{заг}}^l$  — податливость соответственно суппорта, шпинделя, патрона и заготовки.

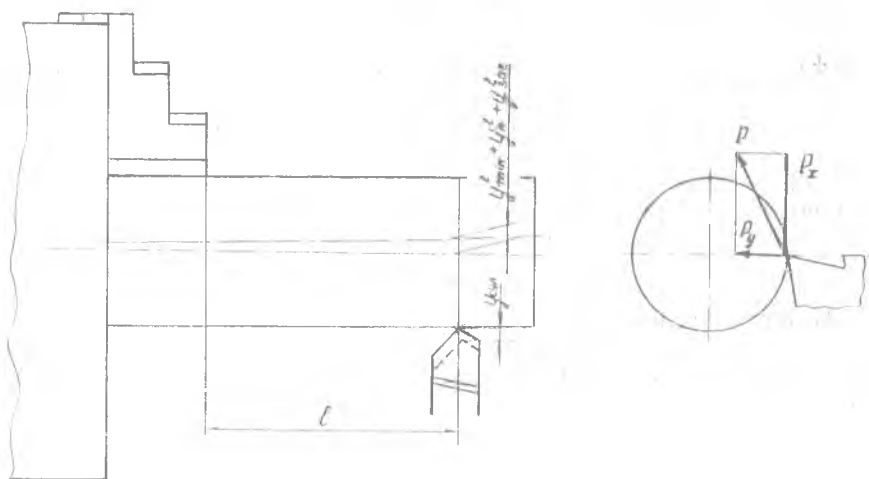


Рис. 1. К определению суммарной податливости технологической системы при обработке валика

При неизменной величине  $P_H$  с увеличением  $l$  будет возрастать нагрузка (изгибающий момент) на шпиндель, патрон и заготовку. Вследствие этого увеличатся деформации и значения податливости шпинделя  $W_{\text{шп}}^l$ , патрона  $W_n^l$  и заготовки  $W_{\text{заг}}^l$ , а следовательно, возрастает и податливость системы  $W^l$ . Отсюда следует, что податливость системы при консольном закреплении валика в патроне токарного станка является переменной величиной: наибольшей в начале обработки резанием (на конце заготовки) и наименьшей в конце обработки (у патрона). Изменение жесткости приводит к появлению погрешности формы в продольном сечении обточенной поверхности. Механизм образования такой погрешности рассмотрим на примере (рис. 2).

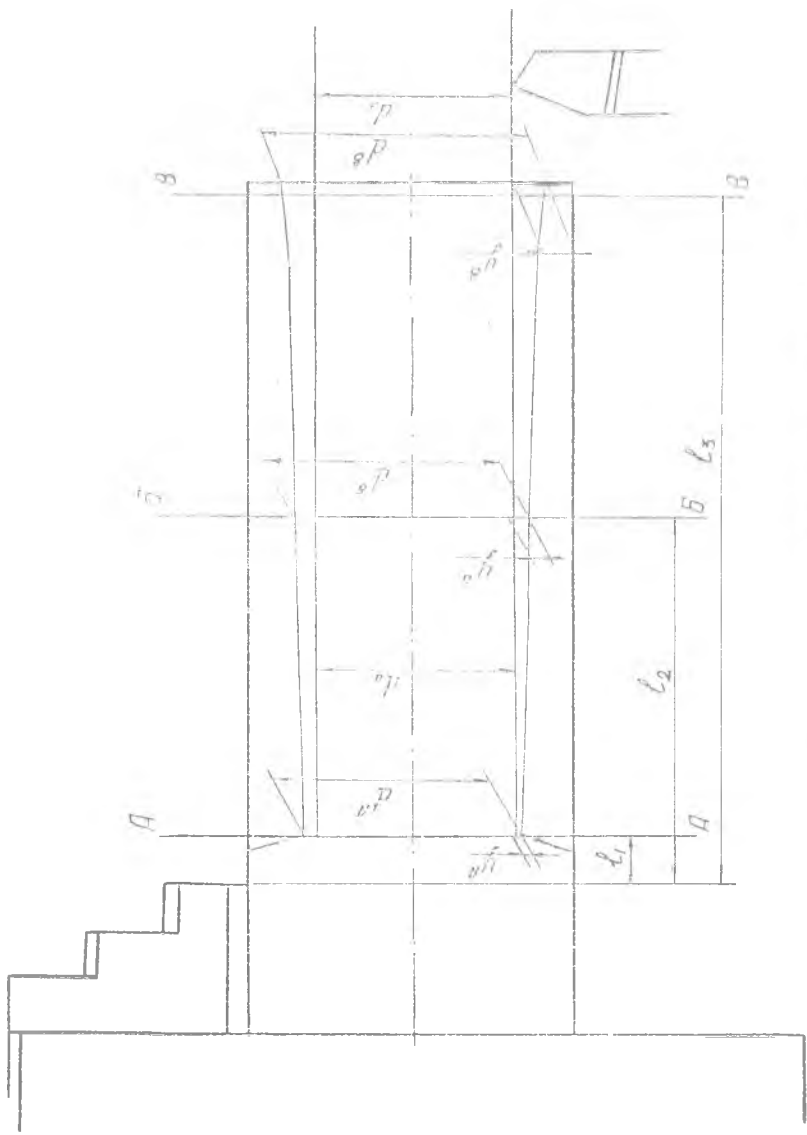


Рис. 2. Обрабатываемость обработки при обточке валов.

Пусть перед началом обработки резец установлен на размере  $d_0$ . Если бы система была абсолютно жесткой (т. е. не деформировалась бы под действием сил резания), то после обточки мы могли бы получить валик строго цилиндрической формы размером  $d_0$ . Но система обладает податливостью. Деформация системы в сечениях А—А, Б—Б и В—В в соответствии с уравнением (2) будет равна

$$y_A = P_y W^A; y_B = P_y W^B; y^B = P_y W^B.$$

Так как  $W^A < W^B < W^B$ , то  $y^A < y^B < y^B$ . Действительные размеры заготовки после обточки в сечениях А, Б и В будут равны соответственно:

$$\left. \begin{aligned} d^A &= d_0 + 2y^A, \\ d^B &= d_0 + 2y^B, \\ d^B &= d_0 + 2y^B. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Так как  $y^A < y^B < y^B$ , то  $d^A < d^B < d^B$  (рис. 2). Пренебрегая кривизной образующей обработанной поверхности, можно считать полученную погрешность формы как конусность величиною

$$\Delta_r = d^B - d^A.$$

Подставляя вместо  $d^B$  и  $d^A$  их значения по (6), после преобразования получим

$$\Delta_\phi = 2(y^B - y^A).$$

Заменяя  $y^B$  и  $y^A$  на их значения, приведенные выше, получим расчетное уравнение для определения погрешности формы:

$$\Delta_\phi = 2P_y(W^B - W^A). \quad (7)$$

## 2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа состоит из двух частей: определение податливости технологической системы и изменения податливости по длине обрабатываемой заготовки; определение погрешности формы заготовки.

Податливость системы измеряется в статическом состоянии по схеме, приведенной на рис. 3. Заготовка 1 закреплена в трехкулачковом патроне. Нагружение системы осуществляется через динамометр 7, закрепленный в резцедержателе 4 суппорта станка. Для создания нагрузки вращают винт 5. При этом через шток 6 усилие  $P$  передается на заготовку 1, а через него на патрон и шпиндель. Такая же по величине, но обратная по направлению сила  $P$  (точнее — реакция) передается через динамометр и резцедержатель на суппорт станка. Величина силы нагружения  $P$  регистрируется с помощью токовихревого датчика 3. При принятом направлении действия силы  $P$  под углом  $30^\circ$  к вертикали получаем соотношение

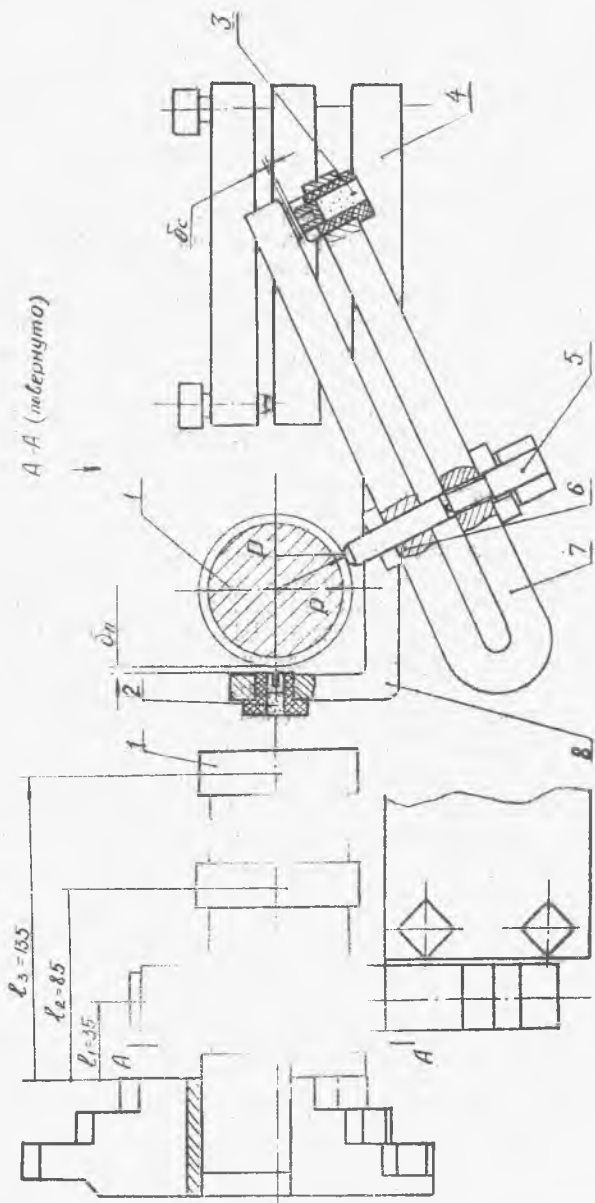


Рис. 8. Схема измерения жесткости

составляющих силы резания  $P_z : P_y = 1,0 : 0,57$ , что весьма близко соответствует общепринятому при точении  $P_z : P_y = 1 : 0,6$ . При этом будет  $P_y = 0,5 P$ , а  $P_z = 0,87 P$ .

При нагружении системы происходит деформация ее элементов (шпинделя, патрона, заготовки, суппорта). Суммарная относительная деформация системы  $y$  измеряется с помощью токовихревого датчика 2, закрепленного на кронштейне 8, который жестко связан с державкой динамометра.

В чисто механических схемах и устройствах экспериментального определения податливости измеряют и регистрируют величину силы нагружения  $P_y$  по заданным ступеням нагружения и соответствующие каждой ступени значения деформации системы  $y$ . После окончания измерений вычисляют значения податливости  $W = y/P_{yi}$ . Затем находят податливость системы  $W$  (путем осреднения, линеаризации).

В данной работе в схеме измерений использован микропроцессор, осуществляющий непрерывное вычисление податливости  $W$  по измеренным значениям  $P_y$  и  $y$ . В заданном диапазоне нагружения (от нуля до  $P_{y\max}$ ) может быть зафиксировано любое число точек измерения  $W$ .

Принципиальная электрическая блок-схема измерительного устройства приведена на рис 4. Электрические сигналы от датчиков силы нагружения ДС и датчика перемещений ДП поступают в блок преобразования БП. Из блока БП электрические сигналы, соответствующие величине силы нагружения  $P_y$  и перемещению  $y$ , поступают в вычислительное устройство (ВУ). По значениям  $P_y$  и  $y$  в ВУ происходит вычисление податливости  $W = y/P_{yi}$ , значение которой регистрируется на блоке цифровой индикации (БЦИ). Там же регистрируются значения  $y$  и  $P_y$ .

Для определения зависимости  $W = f(l)$  измерение податливости производится в трех сечениях по длине детали на расстояниях 35, 85 и 135 мм от торца кулачков.

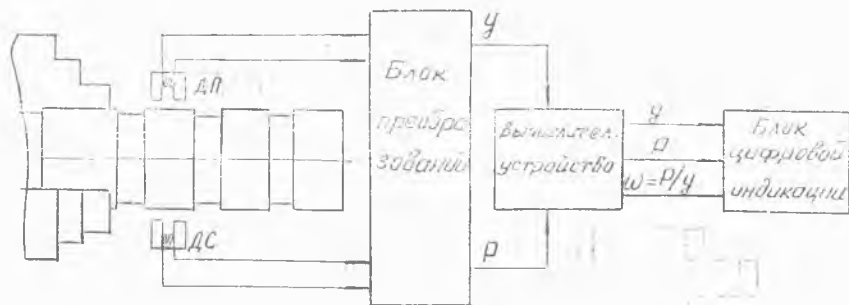


Рис 4. Принципиальная электрическая блок-схема измерительной системы, ДП — датчик перемещений, ДС — датчик силы



Исследованиями установлено, что деформация системы, а значит и ее податливость, зависят от направления действия силы по отношению к расположению кулачков патрона. Если сила  $P$  направлена на кулачок (рис. 5, а) деформация технологической системы будет меньше, при действии силы  $P$  в направлении между кулачками (рис. 5, б) — больше. В связи с этим измерение податливости в каждом сечении следует производить для двух возможных угловых положений патрона.

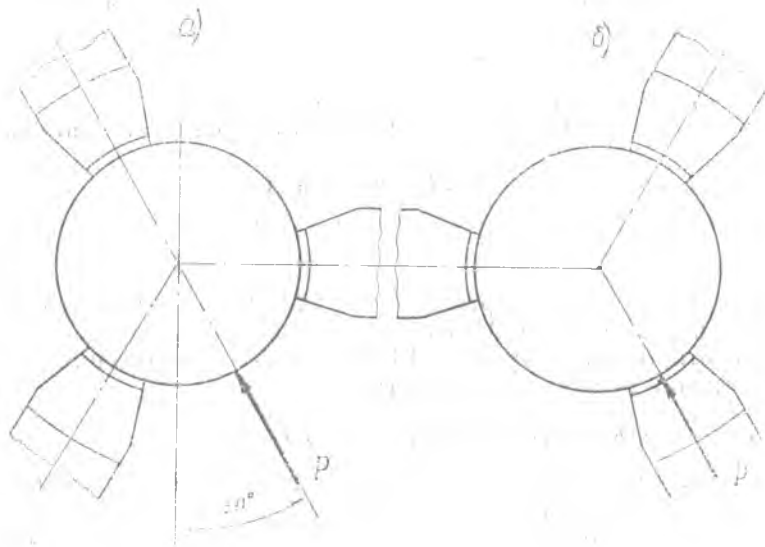


Рис. 5. Схема расположения силы  $P$  по отношению к кулачкам: а — на кулачок, б — между кулачками

Определение податливости системы производится при нагружении ее силой  $P$  от 0 до 1500 Н ступенями через 500 Н. При этом составляющая  $P_y$  будет изменяться от 0 до 750 Н ступенями через 250 Н.

Для исключения влияния зазоров в системе на величину измеряемой податливости *перед проведением эксперимента* в каждом сечении по длине и для каждого углового положения патрона необходимо «опрессовать» систему, т. е. нагрузить ее силой  $P = 1000—1200$  Н, снять нагрузку и только после этого установить показания индикатора деформации на нуль.

По результатам измерений определяют величину податливости для каждого сечения (вылета) по методике, излагаемой в п. 3 настоящей инструкции.

Во второй части работы необходимо определить действительную и расчетную погрешность обработки (погрешность формы в про-

дольном сечении), обусловленную влиянием изменения податливости системы по длине обработки. Для определения действительной погрешности сначала производят предварительное обтачивание всех трех поясков заготовки с одного прохода при легких режимах резания  $t = 1,0$  мм и  $S = 0,1$  мм/об. Цель этого обтачивания — устранить возможные погрешности формы и расположения поверхностей заготовки с тем, чтобы они не могли повлиять на результаты эксперимента. Затем выполняется основное обтачивание всех поясков на режимах ориентировочно  $t = 1,0$  мм и  $S = 0,3$  мм/об, а далее вычисляют фактическую погрешность формы

$$\Delta_{\phi} = d_3 - d_1,$$

где  $d_3$  и  $d_1$  — размеры третьего и первого поясков.

Расчетная или ожидаемая погрешность определяется по уравнению

$$\Delta_{\text{расч}} = 2 P_y (W_3 - W_1). \quad (8)$$

Составляющую  $P_y$  следует определять по формуле

$$P_y = C_{py} t^{X_{py}} S^{Y_{py}} \quad (9)$$

при значениях  $t$  и  $S$ , которые были приняты при основном обтачивании. В качестве  $W_3$  и  $W_1$  следует принимать значения податливостей соответственно при  $l_3 = 135$  и  $l_1 = 35$  мм, полученные экспериментально в первой части работы.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить заготовку в патроне так, чтобы расстояние от торца кулачков до середины первого бурта заготовки было  $l = 35$  мм. Закрепить заготовку ключом последовательно через все шестеренки патрона, постепенно наращивая крутящий момент на ключе, доведя его в последнем круге до  $M_{кр} = 120 - 140$  Нм (12—14 кгсм). Проследить за тем, чтобы биение заготовки при проворачивании, измеряемое индикатором на крайнем бурте, было не более 0,1 мм.

2. Установить державку с динамометром в резцедержатель суппорта. При установке должно обеспечиваться совпадение оси датчика  $Z$  перемещений (рис. 3) с горизонтальной плоскостью, проходящей через ось заготовки. Это достигается подбором прокладок под державку.

Закрепить державку в резцедержателе. При этом, во избежание перекоса, крепление производить многократным завертыванием винтов резцедержателя при постепенном последовательном наращивании усилия на ключе.

3. Отвести суппорт в сторону задней бабки. Вставить в отверстие скобы динамометра центронскагель (рис. 6) и, перемещая суппорт в поперечном направлении, установить его в такое положение, чтобы ось центронскагеля проходила через линию центров станка. Тем самым будет обеспечено действие силы нагружения  $P$

по направлению, проходящему через ось вращения шпинделя с заготовкой.

До окончания измерения податливости суппорт в поперечном направлении не перемещать.

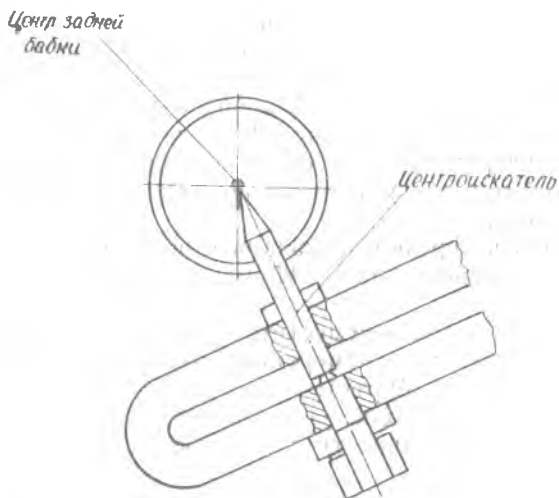


Рис. 6. Схема определения оси заготовки с помощью центроискателя

4. Вынуть центроискатель и установить в отверстие скобы динамометра шток *б* (рис. 3). Переместить суппорт в продольном направлении и установить его в положение для замера податливости на  $l = 35$  мм (первый буртик). При перемещении суппорта ни шток *б*, ни датчик 2 не должны касаться буртиков заготовки.

5. Повернуть патрон с заготовкой в положение, показанное на рис. 5, а (направление действия силы нагружения  $P$  на кулачок). Проверить, чтобы цифровой индикатор нагрузки в БЦИ показывал нуль. Если при этом на БЦИ величина силы отлична от 0, но не превышает 10 Н, то вращая ручку «настройка» измерительного прибора, привести стрелку к положению, когда  $P = 0$ . Если величина  $P > 10$  Н, то перемещением датчика привести систему к положению, когда  $P < 10$  Н, и далее настройкой установить на БЦИ  $P = 0$ .

6. Для устранения влияния зазоров и неплотности стыков на точность измерения провести предварительное нагружение системы силой  $P = 1000 \dots 1200$  Н ( $P_y = 500 \dots 600$  Н), снять нагрузку.

7. Проверить показания цифрового индикатора перемещений в БЦИ. Если они отличаются от нуля, то вращая ручку «настройка»

прибора индикатора перемещений, приводим БЦИ в нулевое состояние. Нагружая систему, замерить податливость системы при  $P_y = 250, 500$  и  $750$  Н (при  $P = 500, 1000$  и  $1500$  Н). Указанные значения  $P_y$  и соответствующие им значения податливости  $W$  по показаниям БЦИ занести в протокол.

8. Снять нагрузку, повернуть патрон против часовой стрелки на  $60^\circ$  с тем, чтобы привести его в положение, показанное на рис. 5, б.

9. Повторить переходы, указанные в пп. 6 и 7. Произвести измерение податливости при нагружении «от кулачка» и занести полученные при измерении значения  $W$  в протокол.

10. Снять нагрузку, переместить суппорт в продольном направлении в положение для измерения податливости при  $l = 85$  мм (по второму буртику).

11. Повторить переходы, указанные в пп. 6, 7, 8 и 9. Провести измерение податливости на  $l = 85$  мм для двух угловых положений патрона.

12. Снять нагрузку, переместить суппорт в продольном направлении в положение для измерения податливости при  $l = 135$  мм (по правому крайнему бурту).

13. Повторить переходы, указанные в пп. 6, 7, 8 и 9. Произвести измерение податливости на  $l = 135$  мм для двух угловых положений патрона.

14. Предъявить преподавателю занесенные в протокол результаты измерения податливости. При утверждении результатов снять со станка динамометр и выключить систему измерения. Если при проведении эксперимента получены неудовлетворительные результаты, то согласно указанию преподавателя повторить эксперимент.

15. Установить в резцедержателе станка проходной резец. Проточить все пояски предварительно на режиме  $t = 0,1$  мм и  $S = 0,1$  мм/об. Замерить диаметры поясков и занести результаты измерения в протокол.

16. Произвести основную проточку всех поясков с одного прохода на режиме  $t = 1,0$  мм,  $S = 0,3$  мм/об. Замерить размеры поясков и результаты измерения записать в протокол.

17. Предъявить преподавателю результаты проточки поясков. При удовлетворительных результатах сдать рабочее место учебному мастеру лаборатории. Если результаты признаны преподавателем неудовлетворительными, обточку поясков следует повторить.

#### 4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ И СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. По результатам замеров нагрузки и податливости установить зависимость податливости системы от нагрузки  $W = f(P)$  и от вылета  $W = f(l)$ , для этого:

1.1. Для каждого сечения  $l = 35,85$  и  $135$  мм и для каждой степени нагружения  $P_y = 250, 500$  и  $750$  Н вычислить значения податливости как среднее значение из замеренных для двух угловых положений патрона.

1.2. На бланке отчета по лабораторной работе построить график зависимости  $W = f(l)$  для всех степеней нагружения (рис. 7).

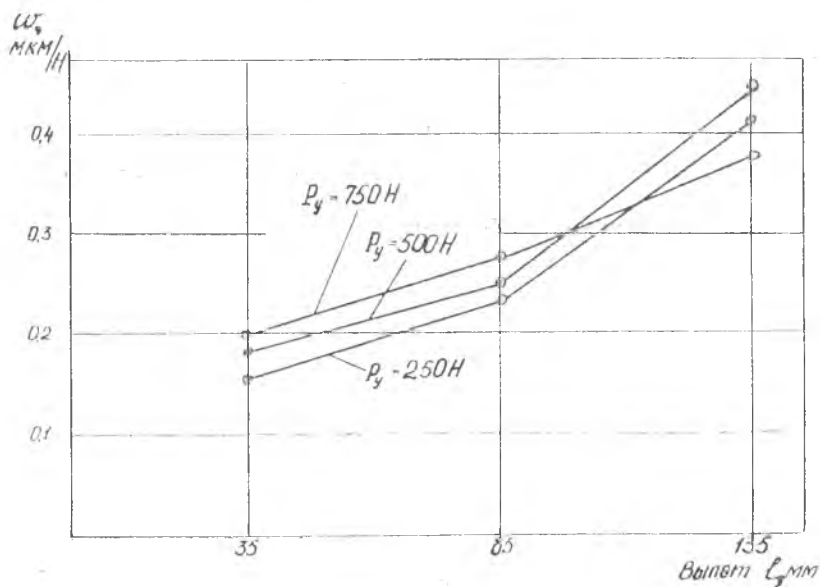


Рис. 7. Графики зависимости податливости от вылета  $W = f(l)$  при различных значениях нагрузки  $P_y$

2. Определить фактическую (действительную) погрешность формы по уравнению

$$\Delta_f = d_3 - d_1,$$

где  $d_3$  и  $d_1$  — значения диаметра поясков (буртиков), замеренные после основного обтачивания.

3. Определить расчетную погрешность формы, для этого:

3.1. Вычислить фактическое (действительное) значение глубины резания  $t_f$  основного обтачивания по уравнению

$$t_f = \frac{d_{\text{предв}} - d_{\text{осн}}}{2},$$

где  $d_{\text{предв}}$  и  $d_{\text{осн}}$  — размеры пояска после предварительного и окончательного обтачивания.

3.2. Вычислить силу резания по уравнению

$$P_y = C_{py} t_{\text{ф}}^{\lambda_{py}} S^{\lambda_{py}}$$

При этом следует принять  $C_{py} = 243$ ,  $X_{py} = 0,9$ ,  $Y_{py} = 0,6$ .

3.3. По кривой  $\dot{W} = j(l)$  в отчете установить значения податливости системы  $W_3$  для  $l = 135$  мм и  $W_1$  для  $l = 35$  мм. Если значения податливости для  $P_y = 250, 500$  и  $750$  Н не совпадают, принять за расчетное следует значение податливости при значении нагрузки, близкой к вычисленному в п. 3.2 значению  $P_y$ .

3.4. Вычислить расчетную погрешность формы

$$\Delta_p = 2 P_y (W_3 - W_1).$$

4. Сопоставить значения  $\Delta_{\text{ф}}$  и  $\Delta_p$  и объяснить причины несоответствия.

5. Оформить отчет по лабораторной работе.

*Исаенко Иван Александрович.  
Смирнов Геннадий Владиславович*

*ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ НА ТОЧНОСТЬ ФОРМЫ  
ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ*

Редактор Т. К. Крестина  
Техн. редактор Н. М. Каленюк  
Корректор Н. С. Купринова

Сдано в набор 28.02.89 г. Подписано в печать 22.05.89 г.  
Формат 60×84 1/16. Бумага афишная.  
Печать высокая. Усл. п. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,6.  
Т. 500 экз. Заказ 253.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С. П. Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. ЭОЗ Куйбышевского авиационного института,  
443001 г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.