

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА**

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОЙ СИЛЫ  
И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА  
ПРИ СВЕРЛЕНИИ**

**КУЙБЫШЕВ 1983**

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный  
институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОЙ СИЛЫ И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА  
ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Утверждено редакционным  
советом института в качестве  
методических указаний  
к проведению лабораторных  
работ

Куйбышев 1983

УДК 621.9:539:621.317.004.14

В данной лабораторной работе студенты знакомятся с крутящими моментами и силами, действующими на сверло. Также рассматриваются оборудование и специальная аппаратура для их измерения. Методика выполнения работы предусматривает отыскание расчетных формул для сил и крутящих моментов и определение влияния на них поперечной кромки сверла и характеристик обрабатываемого материала.

Авторы-составители: Ф.П.Уривский, Е.В.Бурмистров, А.Н.Волков

Рецензенты: М.К.Клебанов, А.В.Тарасов

## Лабораторная работа № 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОЙ СИЛЫ И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Ц е л ь р а б о т ы: экспериментальное исследование крутящего момента  $M$  и осевой силы  $P$  в зависимости от диаметра сверла и подачи для данного материала; изучение влияния на крутящий момент подточки поперечной кромки и свойств обрабатываемого материала.

#### Теоретические основы эксперимента

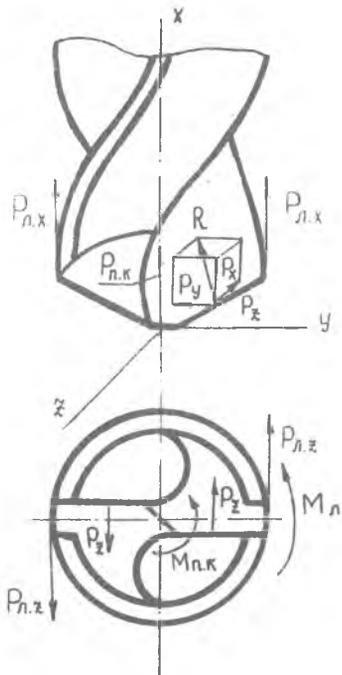
При расчете наиболее выгодного режима резания применительно к процессу сверления, а также для выполнения поверочных расчетов на прочность, жесткость и виброустойчивость инструмента и элементов станка, при определении мощности привода необходимо знать осевую силу и крутящий момент, действующие на сверло, и их зависимость от режимов резания и других условий обработки.

В процессе работы сверло находится под действием сил, изображенных на рис.1.

На каждую режущую кромку действует равнодействующая сила резания  $R$ , которую можно разложить на три составляющие:  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ . На поперечную кромку действует сила  $P_{r,k}$ , направленная вдоль оси сверла  $X$ , и пара сил, создающая момент  $M_{r,k}$  в плоскости, перпендикулярной к оси сверла.

На направляющие ленточки сверла действуют силы трения  $P_{лз}$ , направленные по оси  $Z$  и создающие момент трения  $M_{л}$  в плоскости, перпендикулярной к оси сверла, и силы трения  $P_{лх}$ , направленные вдоль оси  $X$  и создающие составляющую осевой силы.

При условии правильной (симметричной) заточки главных режущих кромок равнодействующая сил, действующих по направлению оси  $Y$ , равна нулю, так как в этом случае силы  $P_y$ , равные по величине и противоположные по направлению, уравниваются. Равнодействующая всех сил, действующих вдоль оси сверла, является силой подачи,



Р и с. 1. Силы и моменты, действующие на сверло

или осевой силой. На основании рис.1 можно записать:

$$P = 2P_x + P_{Л,κ} + 2P_{Л,x}$$

Суммарный крутящий момент  $M$ , действующий на сверло, складывается из момента сил  $P_z$ , момента  $M_{Л,κ}$  и момента  $M_{Л}$  сил трения на направляющих ленточках:

$$M = M_{P_z} + M_{Л,κ} + M_{Л}$$

Крутящий момент и сила подачи при сверлении зависят от геометрии сверла, подачи, диаметра сверла, смазочно-охлаждающей жидкости и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

#### Задачи исследования

#### 1. Измерительная аппаратура

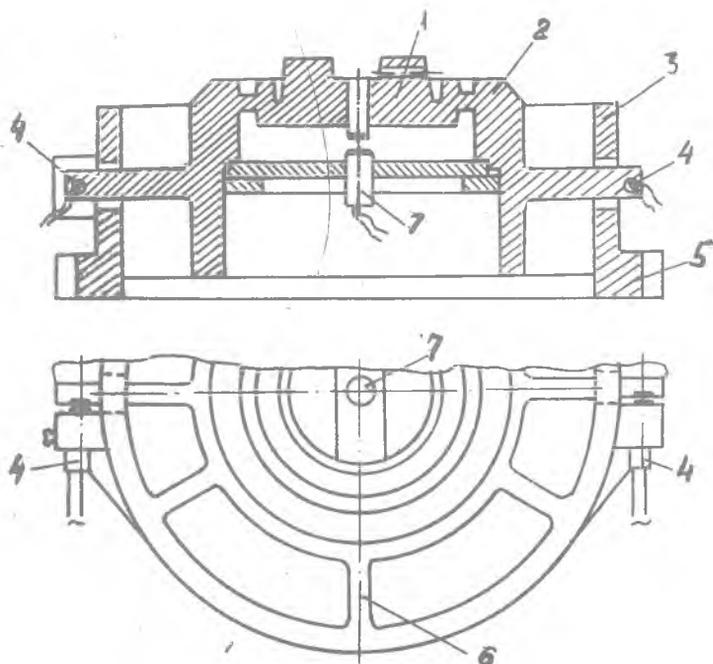
Исследование крутящего момента и осевой силы при сверлении производится с помощью двухкомпонентного динамометра.

На рис.2 представлена механическая часть динамометра, состоя-

щая из опорной плиты 5, наружного обода 3, центральной втулки 2, связанной с наружным ободом ребрами 6, и мембраны 1, на утолщенной части которой крепится заготовка.

Механическая часть динамометра изготовлена из целого куска термообработанной стали 30ХГСА, имеющей следующие механические характеристики:  $\sigma_B = 1100$  МПа,  $\sigma = 10\%$ ,  $H_B = 3130$  МПа. Эта сталь отличается малым расхождением значений статического и динамического модулей упругости и почти не имеет гистерезисной петли в зоне упругих деформаций.

Измерительными элементами динамометра являются токовихревые датчики 4 и 7, с помощью которых измеряются крутящий момент и осевая сила. Для измерения крутящего момента служит датчик, катуш-



Р и с. 2. Механическая часть сверильного динамометра

ка которого закрепляется с помощью угольника на наружном ободе, а ферритовая пластина устанавливается в кронштейне, являющимся частью центральной упругой втулки. Измерение осевой силы производится другим датчиком, катушка которого установлена внутри центральной втулки, а ферритовая пластина - в центре утолщенной части мембраны.

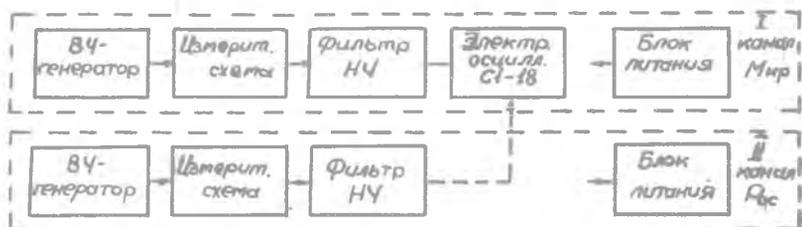
В процессе сверления под действием осевой силы мембрана прогибается, при этом изменяется зазор между катушкой и пластиной датчика 7. Одновременно под действием крутящего момента ребра упругой системы деформируются и центральная втулка с кронштейном поворачивается относительно наружного обода, вследствие чего изменяется зазор между пластиной и катушкой датчика 4. Изменение зазоров между катушками и ферритовыми пластинами в процессе сверления приводит к изменению полного сопротивления датчиков, а следо-

вательно, - к изменению параметров питающего тока.

Для получения неискаженной картины процесса быстрого изменения сил резания необходимо, чтобы частота собственных колебаний упругой системы динамометра в 2-3 раза превышала частоту регистрируемых колебаний. В связи с этим упругая часть динамометра была изготовлена жесткой и легкой. Измерительные перемещения относительно датчиков при максимальных нагрузках не превышают 3...5 мкм. Преимуществом данной конструкции является также отсутствие стыков, что повышает точность измерений.

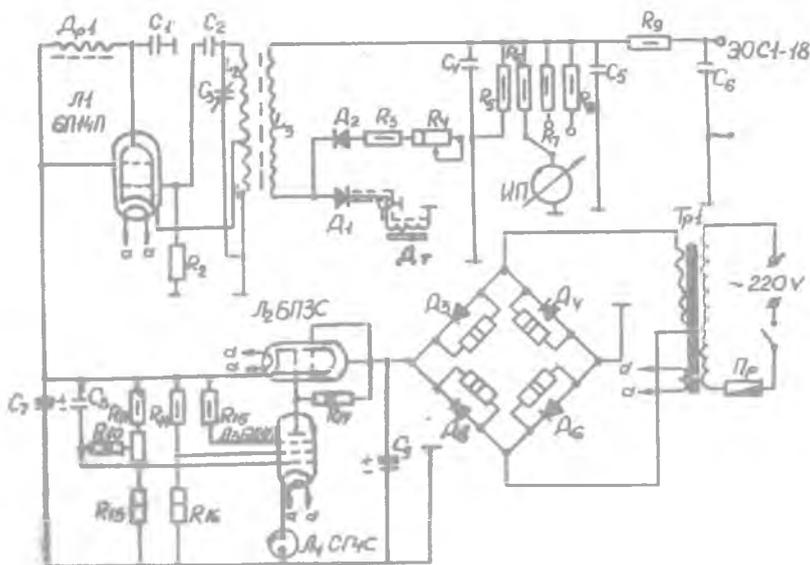
Жесткость упругой части динамометра в направлении осевой силы  $C_p = 5 \cdot 10^5$  н/мм, в направлении крутящего момента -  $C_M = 2 \cdot 10^6$  н·мм/рад, частота собственных колебаний соответственно  $f_p = 4000$  Гц и  $f_M = 2000$  Гц, что позволяет точно измерять колебания силы резания и крутящего момента с частотой 700...1000 Гц.

Блок-схема электрической части динамометрической установки представлена на рис.3. Она состоит из блока питания, генератора высокой частоты, измерительной схемы и низкочастотного фильтра.



Р и с. 3. Блок-схема электрической части динамометра

В измерительной схеме (рис.4) производится сравнение полного сопротивления  $Z_d (D_T)$  датчика и эталонного сопротивления  $Z_g (R_g)$ . Питание датчика осуществляется пульсирующим током с частотой, близкой к резонансной частоте датчика ( $\sim 2$  МГц). Измерительный прибор реагирует на разность токов, протекающих через сопротивления  $Z_d (D_T)$  и  $Z_g (R_g)$ . Для повышения чувствительности измерительной схемы и увеличения тока питания датчика применяется параллельный резонанс. В качестве резонирующей емкости используется собственная емкость датчика и емкость коаксиального подводного кабеля. Такое включение датчика значительно повышает чувстви-



Р и с. 4. Принципиальная схема электрической части динамометра

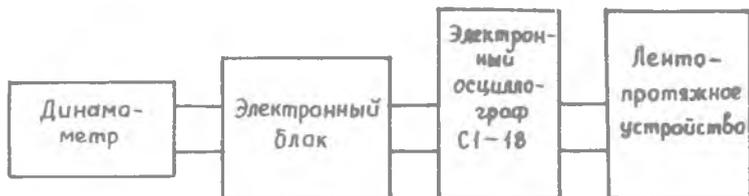
ность прибора (приблизительно в  $Q^2$  раз, где  $Q$  - добротность катушки датчика).

Прибор питается постоянным напряжением от стабилизирующего блока, который состоит из полупроводникового выпрямителя, собранного по мостовой схеме на диодах Д226Б, и электронного стабилизатора напряжения.

Высокочастотный генератор мощностью около 5 Вт собран на лампе 6П14П по одноконтурной схеме с самовозбуждением и трансформаторной связью с катушкой  $L_3$ . Частота генератора составляет около 1 МГц.

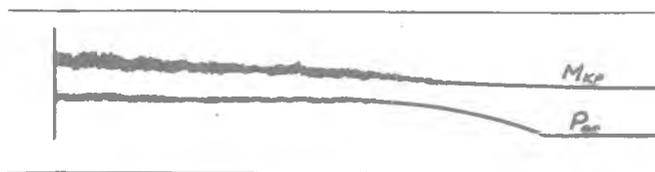
Измерительная схема состоит из диодов типа 103А ( $D_1, D_2$ ), эталонных сопротивлений ( $R_3, R_4$ ), контура датчика с емкостью коаксиального кабеля, конденсатора  $C_3$ , нагрузочного сопротивления  $R_5$ , добавочных сопротивлений  $R_6-R_8$  измерительного прибора. Электрическая часть динамометра позволяет измерять с одинако-

вой чувствительностью как статические, так и динамические перемещения. Диапазон измеряемых частот составляет 0...25 кГц. Запись сигнала с экрана осциллографа С1-18 осуществляется при выключенной горизонтальной развертке на фотопленку, равномерно движущуюся с помощью специального лентопротяжного устройства (рис.5).



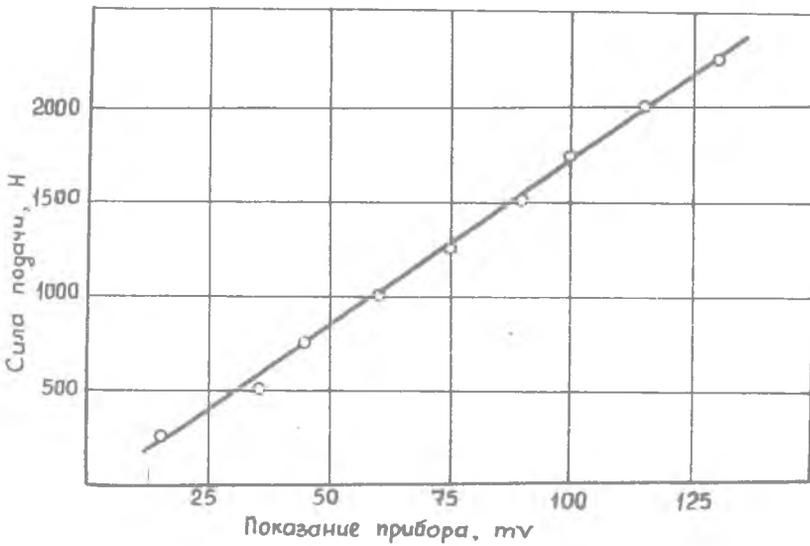
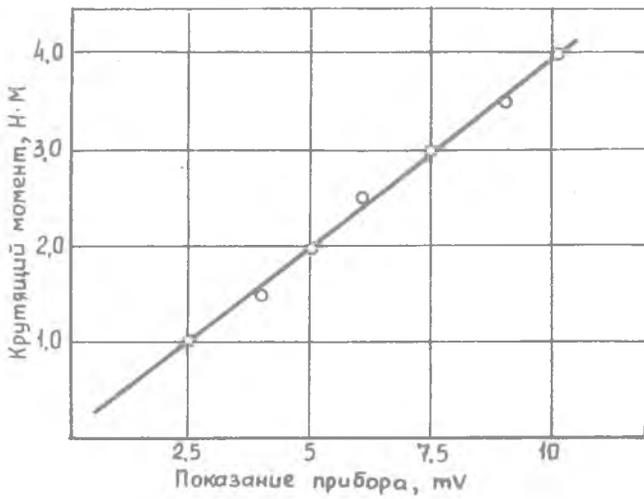
Р и с. 5. Блок-схема динамометрической установки

Типичные осциллограммы крутящего момента и осевой силы приведены на рис.6. Обработка осциллограмм с целью определения числовых значений крутящего момента и усилия подачи, осуществляется на приборе "Микрофот" при увеличении в 10 раз.



Р и с. 6. Типичные осциллограммы крутящего момента и осевой силы

Тарировка динамометра производится непосредственно на станке. Нагружение крутящим моментом осуществляется путем подвески грузов, сила тяжести которых через капроновые нити и систему роликов передается кронштейну центральной втулки. Нагружение мембраны осевой силой производится с помощью образцового пружинного динамометра типа Д0С-250Н. Тарировочные графики, приведенные на рис.7, свидетельствуют о линейности характеристик во всем рабочем диапазоне измеряемых сил и моментов. Взаимное влияние каналов  $P$  и  $M$  не наблюдается.



Р и с. 7. Тарировочные графики крутящего момента и осевой силы

## 2. Установление зависимостей крутящего момента и осевой силы от диаметра сверла и подачи

Для решения этой задачи проводится две серии опытов: "серия подач" и "серия диаметров".

В первой серии опытов при одном и том же диаметре сверла  $d = d_0 = const$ , на различных подачах  $S = S_1, S_2, S_3 \dots$  измеряется крутящий момент и осевая сила. Результаты измерений позволяют найти функции  $M = f_1(S)$  и  $P = f_1'(S)$ .

Во второй серии опытов в результате измерения величин  $M$  и  $P$  при одной и той же подаче  $S = S_0 = const$ , но разных диаметрах сверл  $d = d_1, d_2, d_3 \dots$  находятся зависимости  $M = f_2(d)$  и  $P = f_2'(d)$ .

Указанные зависимости обычно аппроксимируются степенными функциями:

$$\begin{aligned} P &= C_1 d^{x_p} & \text{и} & & P &= C_2 S^{y_p}; \\ M &= C_3 d^{x_M} & \text{и} & & M &= C_4 S^{y_M}. \end{aligned}$$

Графическое представление этих функций в двойных логарифмических координатах дает прямые линии, угловые коэффициенты которых будут равны показателям степеней, т.е.  $x_p = \operatorname{tg} \alpha_1, y_p = \operatorname{tg} \alpha_2$ , и аналогично  $x_M = \operatorname{tg} \beta_1, y_M = \operatorname{tg} \beta_2$  (рис.8).

Постоянные  $C_1, C_2, C_3$  и  $C_4$  определяются величинами ординат, соответствующими значениям  $d = 1,0$  мм и  $S = 1,0$  мм/об.

Найденные таким образом частные зависимости позволяют получить обобщенные формулы:

$$\begin{aligned} P &= C_p d^{x_p} S^{y_p}; \\ M &= C_M d^{x_M} S^{y_M}. \end{aligned}$$

Показатели степеней  $x$  и  $y$  здесь остаются те же, что и в частных зависимостях.

Коэффициенты  $C_p$  и  $C_M$  определяются как среднеарифметические величины для 3-5 опытов, взятых произвольно из проведенных серий:

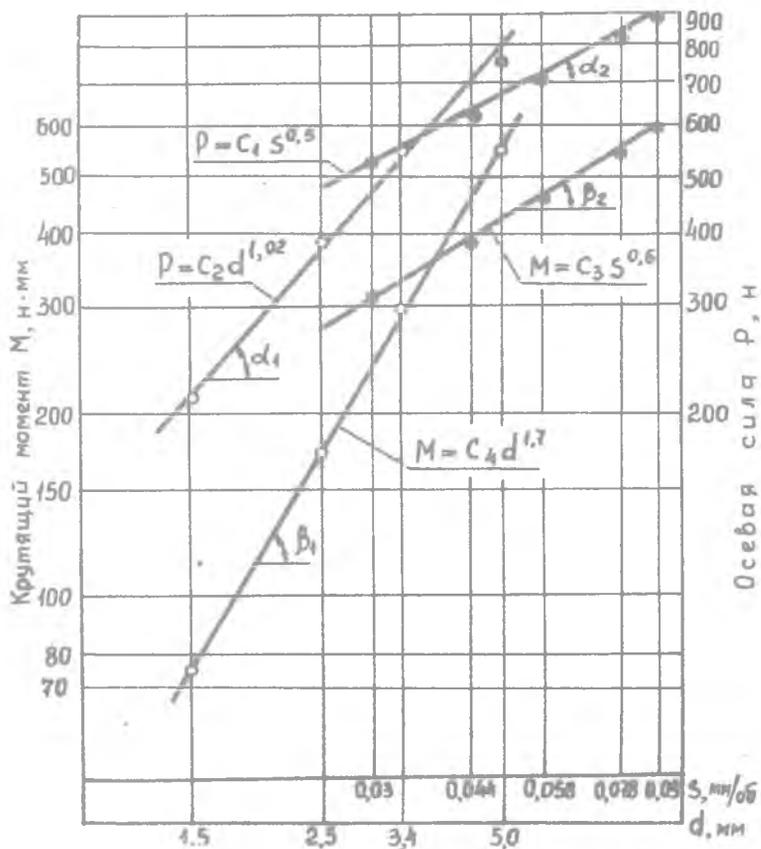
$$C_p = \frac{C_{p1} + C_{p2} + C_{p3} + C_{p4} + C_{p5}}{5},$$

где

$$C_{p1} = \frac{P_1}{d_1^{x_p} S_1^{y_p}}; \quad C_{p2} = \frac{P_2}{d_2^{x_p} S_2^{y_p}} \quad \text{и т.д.}$$

Аналогично рассчитывается и коэффициент  $C_M$ .

Для сверления титанового сплава ОТ4 на основе частных зависи-

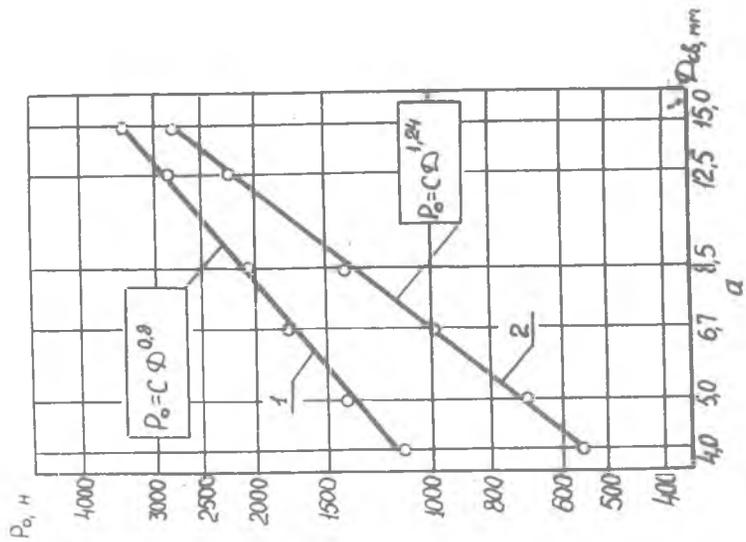
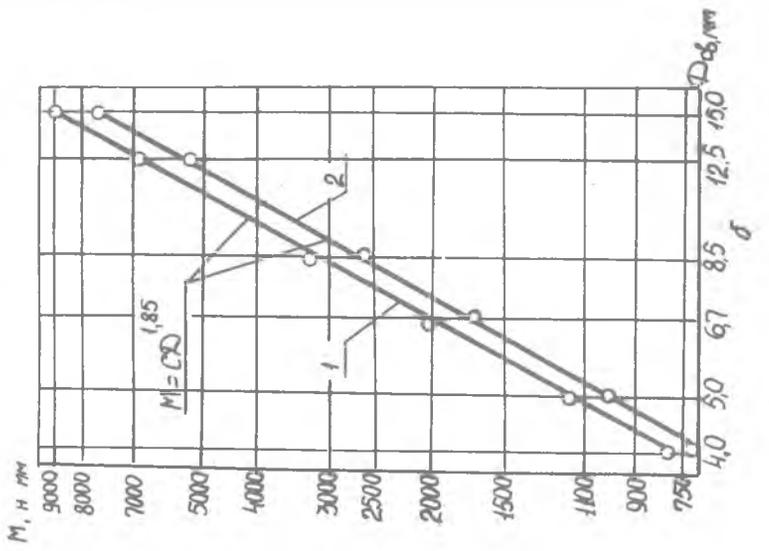


Р и с. 8. График зависимостей крутящего момента и осевой силы от диаметра сверла и величины подачи

ностей, представленных на рис.8, получены следующие обобщенные формулы:

$$P = 841 d^{1.02} S^{0.5} \quad [N];$$

$$M = 326 d^{1.7} S^{0.6} \quad [N \cdot mm].$$



Р и с. 9. Графики зависимостей осевой силы ( а ) и крутящего момента ( б ) от диаметра сверла: 1 - при работе в сплюснном материале; 2 - при рассверливании

### 3. Исследование влияния поперечной кромки сверла на осевую силу

Поперечная кромка оказывает большое влияние на осевую силу и меньшее - на крутящий момент. Это подтверждает, например, сопоставление зависимости крутящего момента и осевой силы от диаметра сверла при обработке жаропрочной стали ЭИ696 (рис.9).

Для того чтобы установить влияние поперечной кромки на осевую силу, в данной лабораторной работе проводятся опыты со сверлом одного диаметра при сверлении в сплошном материале и при рассверливании предварительно подготовленного отверстия диаметром, равным длине поперечной кромки.

На основании данных, полученных при различных подачах, определяется степень участия поперечной кромки в образовании осевой силы путем построения графиков в логарифмических координатах ( $P_1$  и  $P_2$  на рис.10) с последующим определением процентного отношения

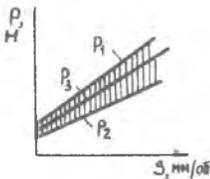
$$K_{п.к} = \frac{P_{п.к}}{P_1} 100\% .$$

В этой формуле  $P_{п.к}$  - разность осевых сил при сверлении в сплошном материале и при рассверливании:

$$P_{п.к} = P_1 - P_2 .$$

Поскольку полностью устранить вредное влияние поперечной кромки при сверлении в сплошном материале не представляется возможным, на практике осуществляют подточку с целью уменьшения длины кромки (рис.11).

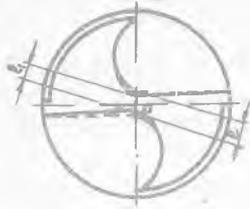
Р и с. 10. Зависимость осевой силы от величины подачи:  $P_1$  - при сверлении в сплошном материале;  $P_2$  - при рассверливании;  $P_3$  - при работе сверлом с подточенной перемычкой



На основании результатов опытов, проведенных со сверлом с подточенной поперечной кромкой при различных подачах, строят график зависимости осевой силы ( $P_3$  на рис.10) и рассчитывают коэффициент

$$K_n : K_n = \frac{P_n}{P_1} 100\% .$$

В этой формуле  $P_n$  - разность осевых сил при работе сверлом обычной конструкции и с подточенной поперечной кромкой.  $P_n = P_1 - P_3$ .



Р и с. II. Подточка перемычки сверла:  $l$  - длина поперечной кромки без подточки;  $l_1$  - длина поперечной кромки с подточкой

коэффициенты:

$$K_M = \frac{M_{обр}}{M_{эт}} \quad \text{и} \quad K_P = \frac{P_{обр}}{P_{эт}}$$

где  $M_{обр}$  и  $P_{обр}$  - соответственно крутящий момент и осевая сила, измеренные при сверлении какого-либо обрабатываемого материала;

$M_{эт}$  и  $P_{эт}$  - соответственно крутящий момент и осевая сила, полученные при обработке материала, принятого за эталон; в качестве эталонного материала обычно принимают сталь 45 ( $\sigma_s = 600$  МПа).

#### 4. Исследование влияния свойств обрабатываемого материала на крутящий момент и осевую силу

Для установления влияния свойств обрабатываемого материала на крутящий момент и осевую силу проводятся опыты по сверлению различных материалов: чугуна, стали, алюминиевого и титанового сплавов сверлом определенного диаметра при заданной подаче.

Полученные значения крутящего момента и осевой силы сопоставляются и рассчитываются поправочные коэффи-

Авторы-составители: Федор Прокофьевич Урывский,  
Евгений Васильевич Бурмистров,  
Александр Николаевич Волков

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОЙ СИЛЫ  
И КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Методические указания к лабораторной работе № 2

Редактор Э.А.Г р я з н о в а  
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к  
Корректор Е.Г.Ф и л и п п о в а

Подписано в печать 13.06.83.  
Формат 60x84 1/16. Бумага оберточная белая.  
Печать оперативная. Усл.п.л. 0,9.Уч.-изд.л. 0,9.  
Т. 500 экз. Заказ № 3819

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П.Королева,  
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.  
Типография им. В.П.Мяги, г. Куйбышев, ул.Венцека, 60.