

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР -
Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

А.С.Зыкин, А.Н.Волков

РЕЗАНИЕ И РЕЗУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Лабораторный практикум

Куйбышев 1974

С О Д Е Р Ж А Н И Е

§ 1. Изучение геометрии и конструкции резцов.....	4
§ 2. Заточка резцов.....	12
§ 3. Изучение конструкции, расчет и измерение элементов червячной модульной фрезы.....	16
§ 4. Изучение конструкции, расчет и измерение параметров долбяка.....	23
§ 5. Исследование сил резания при точении.....	29
§ 6. Исследование осевой силы и крутящего момента при сверлении.....	39
§ 7. Исследование температуры резания методом естественной термопары.....	47
§ 8. Исследование остаточных поверхностных напряжений.....	51
П Р И Л О Ж Е Н И Е	55

Альберт Сергеевич Зыкин,
Александр Николаевич Волков

Лабораторный практикум по курсу
"Резание и режущий инструмент"

Редактор В.Я.Резникова
Техн.редактор Н.М.Каленюк
Корректор Л.В.Сидорова

Подписано в печать 4 X.74 г. Объем 4 п.л.

Тираж 2000 экз. Цена 20 коп.

Куйбышевский авиационный институт им. С.П.Королева.

г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Ротапечатный цех областной типографии им. Мяги, г. Куйбышев,
ул. Венцека, 60. Заказ № 415.

Лабораторный практикум знакомит с единой геометрией режущих инструментов, конструкцией и геометрией токарных резцов, червячных модульных фрез и долбяков; с основными понятиями, касающимися сил, температуры резания, остаточных поверхностных напряжений; излагает методику проведения лабораторных работ, рассматривает соответствующую аппаратуру, приборы, их устройство и принцип работы.

Лабораторные работы, включенные в практикум, непосредственно связаны с курсом лекций по резанию материалов и режущему инструменту, закрепляют теоретические знания и способствуют развитию у студентов навыков самостоятельных экспериментальных исследований.

Необходимо помнить, что допуск к лабораторным работам производится после ознакомления с правилами техники безопасности, а выполнение лабораторных работ на металлорежущих станках - в присутствии и с разрешения лаборанта.

Параграфы 1, 2, 7 и 8 написаны кандидатом технических наук, доцентом Зыкиным А.С., параграфы 3, 4, 5, 6 - кандидатом технических наук, доцентом Волковым А.Н.

§ I. Изучение геометрии и конструкции резцов

По применяемости на станках и характеру обработки резцы разделяются на токарные, строгальные и долбежные. Токарные резцы бывают: проходные (прямые, отогнутые и упорные), предназначенные для обработки наружных цилиндрических поверхностей; расточные — для расточки отверстий; отрезные — для прорезки канавок и отрезки заготовок; подрезные торцевые для подрезки торца деталей; фасонные — для образования фасонных поверхностей.

Быстрорежущие резцы небольших размеров изготавливают цельными. Резцы средних и крупных размеров — составными. Державку, как правило, изготавливают из конструкционной стали, а на режущую часть механически крепится или припаивается пластинка из инструментального материала и затачивается под заданную геометрию.

Размеры державок, формы рекомендуемых инструментальных пластин для токарных резцов в соответствии с ГОСТ 10043-62 и ГОСТ 6743-61 даны в приложении (таб. 1, 2).

Элементы резцов, геометрия и порядок обмера изложены на примере токарного проходного прямого резца.

Конструкция и геометрия проходного отогнутого, расточного и отрезного резцов приведены в приложении (рис. 1, 2 и 3).

Лабораторная работа знакомит с основными понятиями, относящимися к геометрии резцов, с измерительными приборами, методикой обмера и эскизирования.

Элементы резца. Геометрия режущей части

Резец состоит из двух частей: головки или режущей части и тела (державки) резца (рис. 1) высотой "H" и шириной "B".

Головка резца имеет следующие элементы:

переднюю поверхность — поверхность "abcde"

главную заднюю поверхность — поверхность "abb₁a₁"

вспомогательную заднюю поверхность — поверхность "bcc₁b₁"

главную режущую кромку — "ab"

вспомогательную режущую кромку — "bc"

переднее ребро — "bb₁" и вершину резца — точку "b".

Передняя поверхность — поверхность, по которой отходит стружка; задние поверхности — поверхности, обращенные к обрабатываемой заготовке. Главная и вспомогательная режущие кромки образуются пересечением передней поверхности с соответствующей задней поверхностью. Вершина резца (точка "b") в плане может быть острой или закругленной.

На заготовке различают обрабатываемую поверхность, обработанную поверхность и поверхность резания. Поверхность резания образуется непосредственно главной режущей кромкой резца (рис. 2).

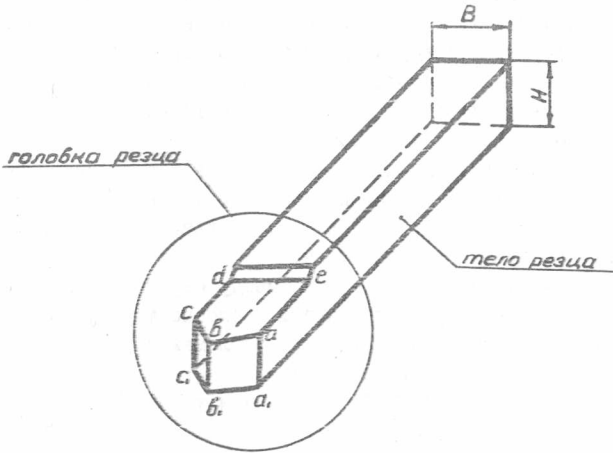


Рис. 1. Части и элементы токарного проходного резца

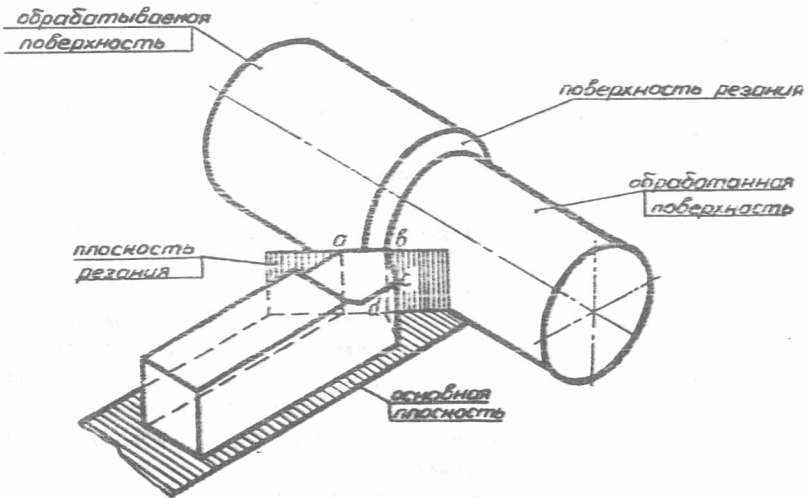


Рис. 2. Поверхности и плоскости при работе токарным проходным резцом

Для определения углов реза принимают следующие координатные плоскости: плоскость резания и основную плоскость (рис. 2).

Плоскость резания - плоскость, касательная к поверхности резания и проходящая через главную режущую кромку реза.

Основная плоскость - плоскость параллельная продольной и поперечной подачам. У токарных резцов за основную плоскость может быть принята нижняя опорная поверхность реза.

Геометрию режущей части реза рассматривают в главной и вспомогательной секущих плоскостях.

Главная секущая плоскость - плоскость перпендикулярная к проекции главной режущей кромки на основную плоскость. NN - след главной секущей плоскости (рис. 3). В главной секущей плоскости измеряют следующие главные углы:

передний угол " γ " - угол между передней поверхностью реза и плоскостью, перпендикулярной к плоскости резания;

главный задний угол " α " - угол между главной задней поверхностью и плоскостью резания;

угол заострения " β " - угол между передней и главной задней поверхностями реза;

угол резания " δ " - угол между передней поверхностью и плоскостью резания.

Причем $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$

$$\delta + \gamma = 90^\circ$$

Если угол резания " δ " меньше 90° , то передний угол реза считается положительным, если больше 90° - отрицательным.

Вспомогательная секущая плоскость - плоскость, перпендикулярная к проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость, N_1N_1 - след вспомогательной секущей плоскости (рис. 3).

Во вспомогательной секущей плоскости измеряют следующие вспомогательные углы:

вспомогательный задний угол " α_1 " - угол между вспомогательной задней поверхностью и плоскостью, проходящей через вспомогательную режущую кромку перпендикулярно к основной плоскости;

вспомогательный передний угол " γ_1 " - угол между передней поверхностью реза и плоскостью параллельной основной.

Кроме рассмотренных углов резец имеет углы в плане и угол наклона главной режущей кромки.

Углы в плане измеряют в основной плоскости:

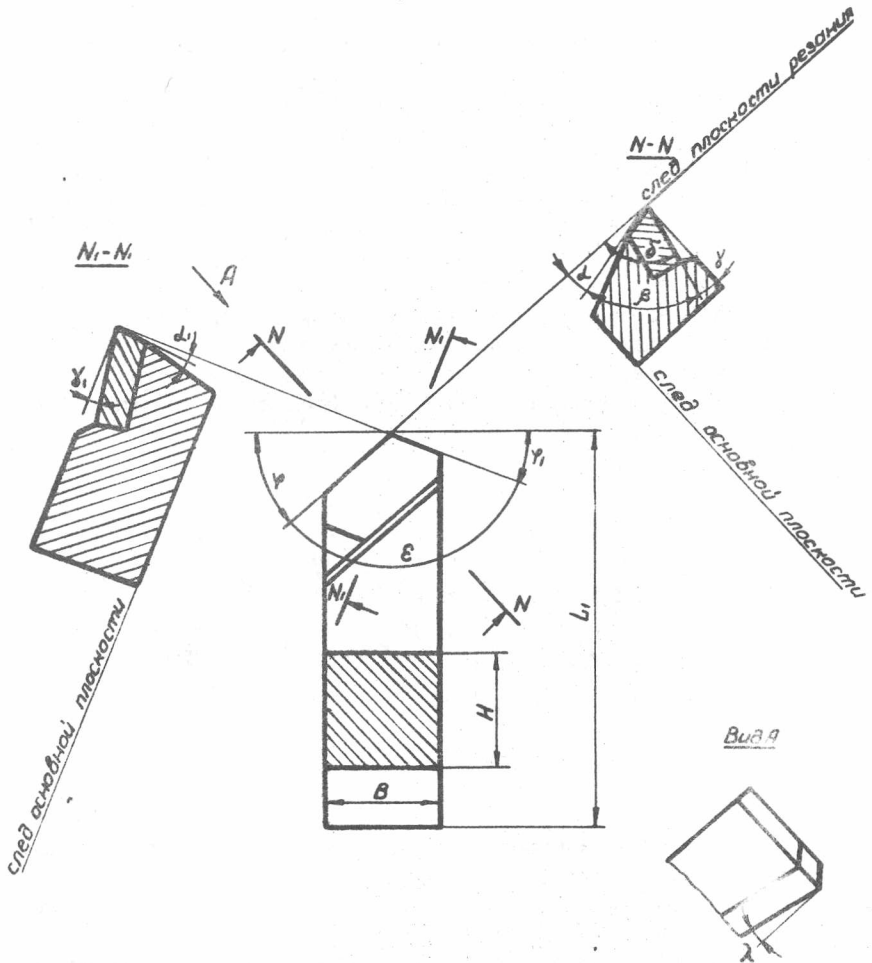


Рис. 3. Конструкция и геометрия токарного проходного резца

главный угол " φ " - угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи;
вспомогательный угол " φ_1 " - угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи.

Угол при вершине " ε " - угол между проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость.

Между углами имеется следующая зависимость:

$$\varphi + \varphi_1 + \varepsilon = 180^\circ$$

Угол наклона главной режущей кромки " λ " - угол, заключенный между главной режущей кромкой и плоскостью, проведенной через вершину резца параллельно основной плоскости. Этот угол измеряется в плоскости, проходящей через главную режущую кромку, перпендикулярно к основной плоскости.

Угол наклона главной режущей кромки считают положительным, если вершина резца будет наименьшей точкой режущей кромки (рис. 4) и отрицательным - если вершина резца будет наибольшей точкой. Угол " λ " равен нулю, когда главная режущая кромка параллельна основной плоскости.

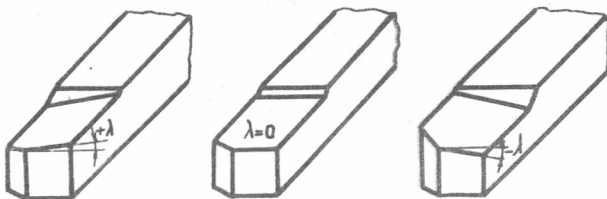


Рис. 4. Углы наклона главной режущей кромки

Обмер и эскизирование резцов

Эскизы резцов выполняются с указанием линейных и угловых размеров, марки, формы и номера инструментальной пластины.

Обмер линейных размеров производится штангенциркулем и масштабной линейкой.

Обмер углов проводят различными шаблонами и несложными измерительными приборами. Наиболее просты по устройству - настольный угломер (прибор МИЗ) и угломер с нониусом (универсальный угломер).

Настольный угломер удобно использовать при измерении главных и вспомогательных углов, а также угла наклона главной режущей кромки; а угломер с нониусом - для измерения углов в плане.

Настольный угломер (рис. 5) состоит из плиты 1, колонки 2, по которой может передвигаться кронштейн 4 с сектором 5, закрепляе-

мым в определенном положении стопорным винтом 3. Сектор 5 имеет градусную шкалу. На секторе укреплен поворотный шаблон 6 с указателем и двумя измерительными гранями "а" и "б", расположенными под прямым углом. При расположении указателя шаблона против нуля градусной шкалы измерительная грань "а" будет находиться в вертикальном положении, а измерительная грань "б" - в горизонтальном положении.

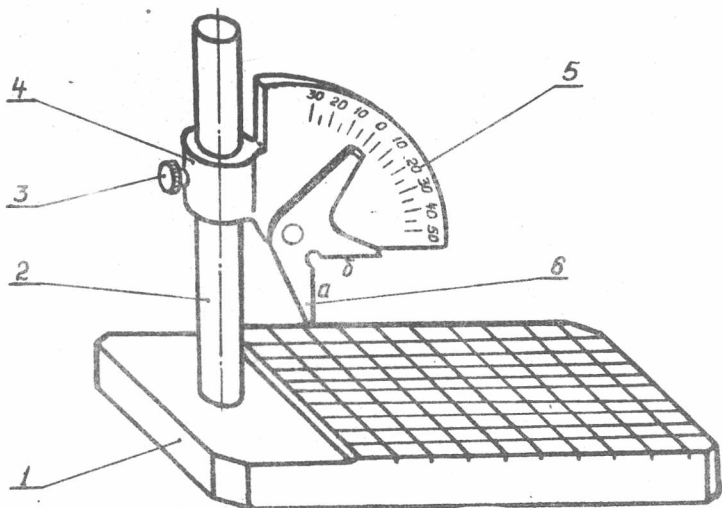


Рис. 5. Настольный угломер:

1 - плита; 2 - колонка; 3 -
стопорный винт; 4 - кронштейн;
5 - сектор; 6 - шаблон

При измерении переднего и главного заднего угла резец устанавливается на плите прибора так, чтобы плоскость вращения шаблона совпадала с главной секущей плоскостью.

Для измерения переднего угла нужно совместить измерительную грань "б" шаблона с передней поверхностью резца и против указателя по шкале прибора отсчитать величину угла (рис. 6).

Для измерения главного заднего угла - измерительную грань "а" шаблона совмещают с главной задней поверхностью.

Аналогичным образом производится обмер вспомогательных углов, но в этом случае резец устанавливается так, чтобы плоскость вращения шаблона совпадала с вспомогательной секущей плоскостью.

При измерении угла наклона главной режущей кромки измерительную грань "б" шаблона совмещают с главной режущей кромкой.

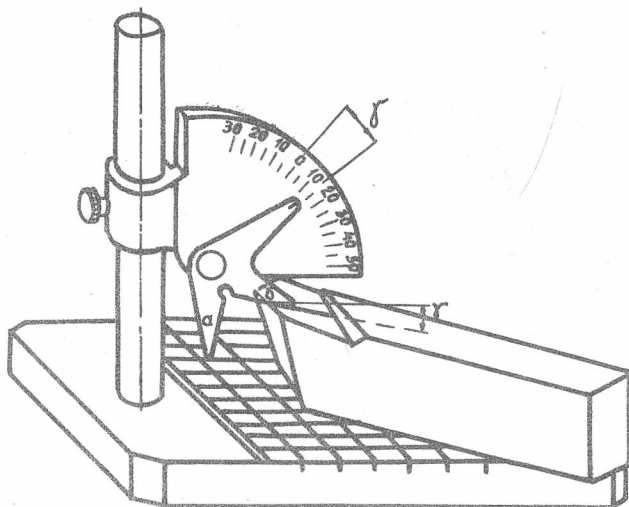


Рис. 6. Измерение переднего угла резца

Угломер с нониусом (рис. 7) предназначен для измерений углов от 0 до 180°. Состоит из основания 2, с градусной шкалой, нониуса 1 с подвижной линейкой 5, съёмной линейки 8. Нониус с подвижной линейкой может поворачиваться вокруг оси 4 основания 2 и закрепляться в определенном положении стопором 3. При измерении углов больше 90° к сторонам контролируемого угла прикладываются подвижная 5 и съёмная 8 линейки. Прибор дает значение угла с вычетом 90°. Отсчет угла проводится по градусной шкале против нуля нониуса.

При измерении углов менее 90° на подвижную линейку 5 с помощью державки 6 крепится угольник 7. К сторонам контролируемого угла

прикладывается съёмная линейка 8 и основание угольника 7. По шкале прибора против нуля нониуса отсчитывается значение угла.

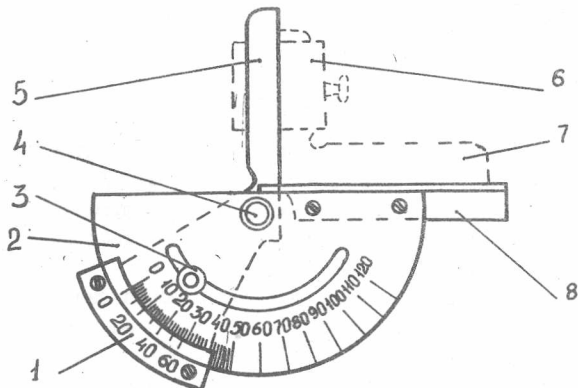


Рис. 7. Угломер с нониусом:

1 - нониус; 2 - основание; 3 - стопор;
4 - ось; 5 - подвижная линейка; 6 - державка; 7 - угольник; 8 - съёмная линейка

При измерении главного угла в плане " φ " подвижная и съёмная линейки совмещаются с боковой поверхностью державки резца и с главной режущей кромкой (рис. 8).

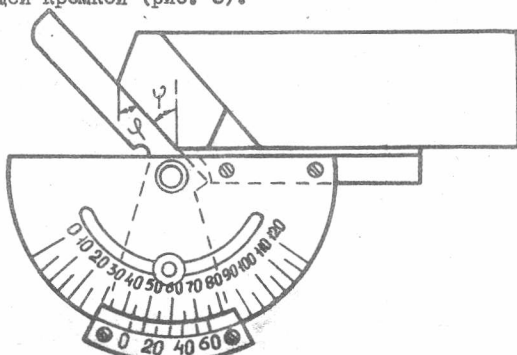


Рис. 8. Измерение главного угла в плане

Аналогичным образом измеряется вспомогательный угол в плане " φ_1 ".

При измерении углов в плане у резцов с отогнутой головкой сначала измеряют угол " φ_1 ", затем угол " ε ". Главный угол в плане " φ " рассчитывают по формуле: $\varphi = 180^\circ - (\varphi_1 + \varepsilon)$.

§ 2. Заточка резцов

Заточка инструмента — это один из видов отделки режущих лезвий инструмента. Отделка производится заточкой и доводкой. Заточка придает режущей части инструмента соответствующую форму и геометрию, а доводка обеспечивает необходимую чистоту режущих поверхностей.

Отделка режущих лезвий производится абразивным инструментом: заточка — шлифовальными кругами; доводка — алмазными кругами, абразивными порошками и пастами. В последние годы находят все более широкое применение наряду с абразивной — электрохимическая, электроискровая, анодно-механическая и другие виды отделки режущих инструментов.

Абразивная заточка производится на универсальных и специальных заточных станках. Универсальные станки предназначены для заточки различных видов режущих инструментов, а специальные — для определенного режущего инструмента (например, для заточки резцов, сверл, фрез и т.д.). Наиболее распространенным универсальным станком является станок модели ЗА64, а специальными — станки моделей 3625 и 3628. Первый из них предназначен для заточки резцов из инструментальных и быстрорежущих сталей, второй — для заточки твердосплавных резцов.

Лабораторная работа знакомит с методами заточки проходных резцов на станке модели 3628, с конструкцией и кинематикой станка. Затачиваются передняя, главная и вспомогательная задние поверхности резца по заданным углам ($\varphi; \varphi_1; \alpha; \alpha_1; \beta$ и т.д.). Затем проводится контроль углов. Значения заданных и фактических углов заносится в таблицу отчетного бланка.

Лабораторная работа проводится под руководством лаборанта.

О п и с а н и е с т а н к а м о д е л и 3628

Станок модели 3628 предназначен для заточки резцов, оснащенных пластинками твердого сплава. На этом же станке можно производить заточку и быстрорежущих резцов.

Станок (рис. 9) представляет собой коробчатую станину, на которой установлены и закреплены шлифовальная бабка и два стола. В шлифовальной бабке смонтированы два симметрично расположенные шпиндели 7, приводимые во вращательное движение посредством клиноременных передач 8 от электродвигателей 9.

Стол станка предназначен для установки специальных приспособлений, служащих для закрепления резцов. Каждый стол состоит из нижней части 2, установленной на направляющих станины 1; средней части 3, лежащей на роликовых направляющих, и верхней части 6.

Для подачи стола на круг служит маховичок 10.

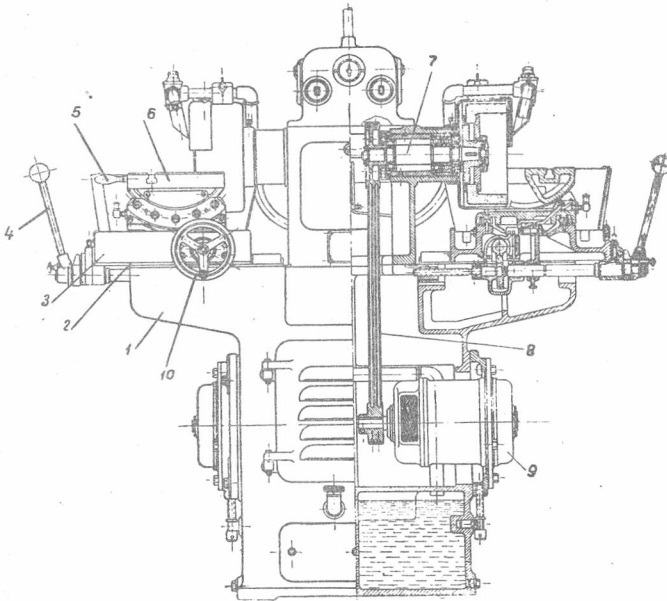


Рис. 9. Заточной станок модели 3628

Возвратно-поступательное перемещение средней части стола параллельно торцевой поверхности шлифовального круга осуществляется рычагом 4.

Поворот верхней части 6 стола вокруг горизонтальной оси осуществляется рукояткой 5. Отсчет угла поворота производится по шкале, расположенной на левом торце стола.

Станок имеет систему охлаждения. Перед работой необходимо проверить наличие защитных ограждений шлифовальных кругов и надежность их закрепления. Без защитных ограждений работать на станке запрещается.

З а т о ч к а п е р е д н е й п о в е р х н о с т и р е з ц а

Заточка производится в специальном приспособлении (рис. 10), которое устанавливается в правый поперечный паз стола.

Резец закрепляется в приспособлении I так, чтобы передняя поверхность была обращена к торцу круга. Вылет резца из приспособления должен составлять $50 + 60$ мм.

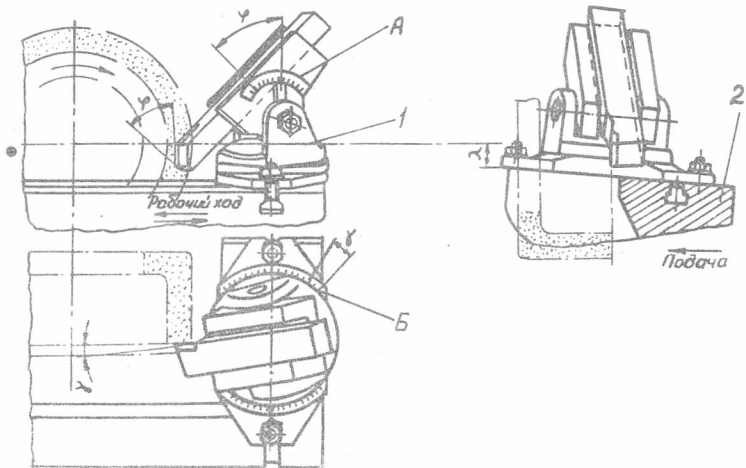


Рис. 10. Установка резца для заточки передней поверхности

Для совмещения передней поверхности резца с торцевой поверхностью шлифовального круга резец нужно повернуть по лимбу "А" вокруг горизонтальной оси на угол " φ ", затем повернуть стол на угол " λ " (рукоятка 5, рис. 9) и по лимбу "Б" повернуть резец на угол " ψ ".

Заточку нужно производить в следующем порядке:

1. Включить электропривод шлифовального круга так, чтобы поверхность круга в месте контакта с резцом перемещалась сверху вниз.

2. Плавко подвести резец к кругу так, чтобы передняя поверхность коснулась торцевой поверхности круга.

3. Включить подачу охлаждающей жидкости и после этого производить заточку резца при возвратно-поступательном движении стола рычагом 4 (см. рис. 9) и при периодической подаче стола на круг маховичком 10 (рис. 9).

З а т о ч к а з а д н и х п о в е р х н о с т е й р е з ц а

Заточка производится в специальном приспособлении I (рис. 11), которое устанавливается в продольный паз стола.

При заточке главной задней поверхности после закрепления резца в приспособлении I резец поворачивают на угол " φ ", а затем на угол " α " с тем, чтобы совместить главную заднюю поверхность с торцевой поверхностью круга.

Поворот резца на угол " φ " вокруг вертикальной оси производят по лимбу "В", а поворот на угол " α " — поворотом стола 2 с помощью рукоятки 5 (рис. 9). Отсчет угла " α " производится по лимбу, закрепленному на левом торце стола.

После проверки правильности установки и закрепления резца заточку производят в том же порядке как и заточку передней поверхности.

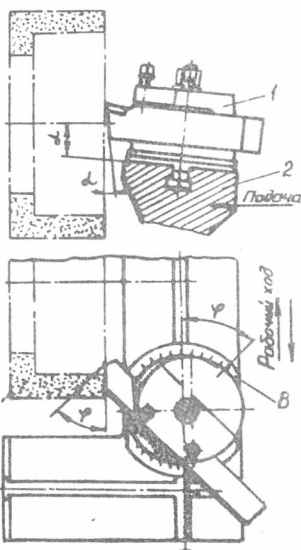


Рис. 11. Установка резца для заточки главной задней поверхности

При заточке вспомогательной задней поверхности резец поворачивают сначала на угол " φ_1 ", а затем на угол " α_1 ", соответственно по тем же лимбам, что и при заточке главной задней поверхности.

Контроль заточки производится с помощью настольного и универсального угломеров.

§ 3. Изучение конструкции, расчет и измерение элементов червячной модульной фрезы

Червячные модульные фрезы служат для нарезания прямозубых, косозубых и червячных колес методом обкатки. В процессе резания фреза и заготовка совершают согласованное непрерывное движение. Червячная модульная фреза (рис. 12) - это червяк, витки которого перерезаны винтовыми канавками, расположенными в расчетном сечении по среднему диаметру перпендикулярно направлению витков фрезы так, что $\omega_{гр\text{ расч.}} = \tau_{гр\text{ расч.}}$. Канавки образуют режущие гребенки. Образование зубьев колеса гребенкой аналогично эвольвентному зацеплению колеса с рейкой. Движение огибания осуществляется при качении без скольжения начальной (делительной) окружности нарезаемого колеса по начальной прямой гребенки, совпадающей с ее средней линией. Для этого за один оборот однозаходной фрезы заготовка поворачивается на один нарезаемый зуб. Размеры профиля зуба фрезы в сечении, нормальном к направлению витков (рис. 12б), соответствуют размерам исходного контура зубчатой рейки нарезаемого колеса.

У червячной модульной фрезы зубья делаются затылованными по архимедовой спирали, что позволяет сохранять почти неизменными профиль зубьев и задний угол при переточках, осуществляемых по передней поверхности. Если зубья фрезы шлифуются, то делается двойное затылование, а шлифуется только первый затылок. На рис. 12в величина "К" представляет падение первого затылка, а "К₁" - падение второго затылка на центральном угле γ .

В связи с тем, что при переточках фрезы изменяются наружный D_e и средний D_t диаметры, расчетное сечение принимается в середине рабочего участка зуба фрезы (ОА на рис. 12в). Уменьшение D_t ведет к увеличению угла τ_g и к уменьшению нормального шага t_n

$$t_{oc} = \pi D_t x \cdot \tau_g \tau_{gx};$$

$$t_{nx} = t_{oc} \cdot \cos \tau_{gx}.$$

Осевой шаг t_{oc} не изменяется. Если номинальный угол и расчетный шаг приняты в некотором сечении посередине рабочего участка зуба то будет использоваться положительная и отрицательная часть поля допуска на нормальный шаг $t_n^{x,p}$ и максимально увеличен срок службы фрезы.

Согласно ГОСТу 9324-60 червячные чистовые однозаходные фрезы для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем изготавливаются трех типов и четырех классов точности:

- тип I - фрезы цельные прецизионные класса точности AA;
- тип II - фрезы цельные общего назначения классов точности A, B, и C;
- тип III - фрезы сборные общего назначения классов точности A, B и C.

Рекомендуемое назначение фрез:

класса AA - для колес 7-й степени точности

-"- A - "-"- 8-й "-"-

-"- B - "-"- 9-й "-"-

-"- C - "-"- 10-й "-"-

Степень точности колес указана в соответствии с ГОСТом I643-56.

Число заходов червячных фрез зависит от заданной точности нарезаемых зубчатых колес. С увеличением числа заходов увеличивается производительность и уменьшается точность нарезаемых колес. Поэтому чистовые фрезы делаются однозаходными.

Цель лабораторной работы изучить конструкцию червячной модульной фрезы, методы измерения и расчета ее основных элементов.

Обмер и расчет элементов червячной модульной фрезы

Согласно клеймению и общим осмотром фрезы определяются модуль m , угол зацепления α_0 , угол наклона винтовой канавки $\omega_{д.расч}$, шаг режущей спирали $T_{p.c.}$, число зубьев (гребенок) фрез Z , число заходов фрез i .

Штангенциркулем измеряются основные линейные размеры $D_e, D_i, L, a, d, l, t_i, b, H$ (рис. I2). Полученные результаты сопоставляются с табличными значениями размеров по ГОСТу 9324-60 (табл. 3+5 приложения). Размеры шпоночных пазов должны соответствовать ГОСТу 9472-60 (табл.6 приложения).

Высота профиля зуба h измеряется зубомером как показано на рис. I3, или штангенциркулем с глубиномером.

Размер по шкале "А" устанавливается таким образом, чтобы между ножками зубомера и основанием зуба был зазор 0,5 - 1 мм для исключения влияния радиуса перехода Z_2 (рис. 12б) на результаты измерения. Линейка "В" прижимается к вершине зуба и по ней производится отсчет размера h . При наличии канавки во впадине гребенки концы ножек зубомера ставятся на высоте рабочей части зуба h .

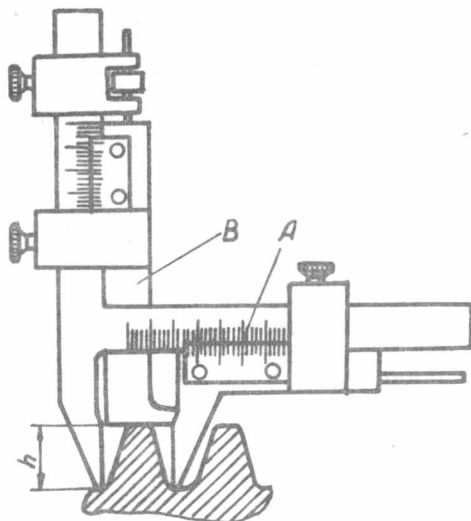


Рис. 13. Измерение высоты профиля зуба фрезы зубомером

Высота головки зуба фрезы h' выбирается равной высоте ножки зуба фрезы, т.е. составляет величину

$$h' = \frac{h}{2}.$$

Определяются толщина зуба S_n и шаг гребенки t_n в нормальном сечении на делительной прямой. Для этого зубомером (рис. 14) измеряются величина S_n и блочный размер M_n на высоте $h_n = \frac{h}{2}$. Нормальный шаг находится как разность произведенных измерений

$$t_n = M_n - S_n.$$

Значения t_n и S_n в расчетном сечении по среднему диаметру рассчитываются по формулам

$$t_n = \pi \cdot m$$

$$S_n = \frac{t_n}{2}$$

Величина осевого шага определяется расчетом по формуле

$$t_{oc} = \frac{t_n}{\cos \omega_{г\text{ расч.}}}$$

Угол профиля рейки α_0 находится расчетом

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{S_2 - S_1}{2(h_2 - h_1)}$$

Величины толщин зуба S_1 и S_2 измеряют зубомером на высотах h_1 и h_2 (рис. 15)

$$h_1 = 0,5 \div 2 \text{ мм};$$

$$h_2 = h - (0,5 \div 2) \text{ мм.}$$

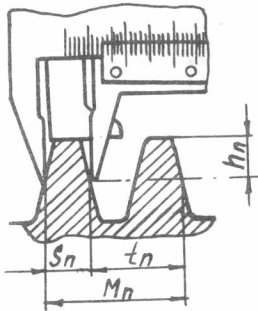


Рис. 14. Схема измерения нормального шага

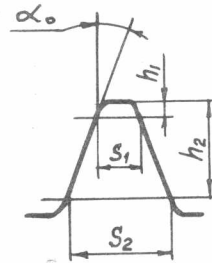


Рис. 15. Схема измерений для определения угла профиля зуба фрезы

Измерение падения затылка производится по схеме, представленной на рис. 16. Фрезу закрепляют на оправке и устанавливают в центрах прибора. Индикатор "И" устанавливают на заднюю поверхность зуба фрезы по наружному диаметру вблизи вершины зуба и дают небольшой натяг, после чего стрелка индикатора устанавливается на нуль. Поворачивают фрезу на некоторый угол φ , отсчитываемый

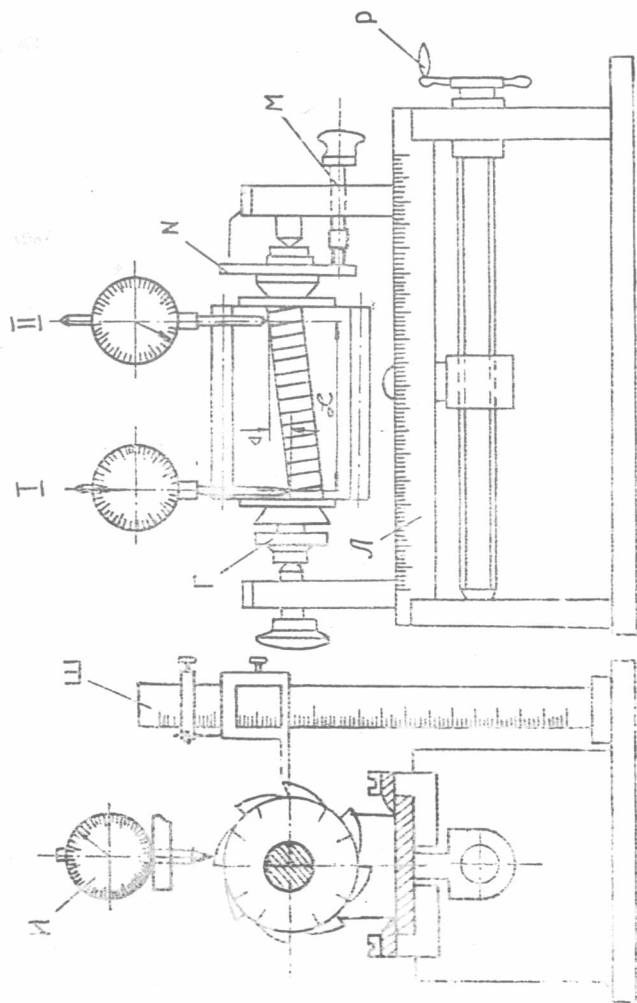


Рис. 16. Схема для измерения элементов червячной фрезы:
а) схема прибора по изданию завода; б) схема определения
шага редукции спирали

по шкале на диске N , и определяют падение затылка K' по индикатору, после чего производят расчет падения затылка K , соответствующее центральному углу между зубьями фрезы $K = K' \frac{2}{\varphi}$, где $\varphi = \frac{360}{Z}$.

Аналогично находится падение второго затылка K_1 .

Далее определяются задний угол по наружному диаметру фрезы α_B и задний угол на боковых сторонах зубьев α_N

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{K \cdot Z}{\pi \cdot D_e};$$

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha_B \cdot \sin \alpha_0.$$

Средний диаметр в расчетном сечении, являющийся условным и служащий для определения угла наклона винтовой канавки и других величин, при расчете новой фрезы определяется по формуле

$$D_{t \text{ расч.}} = D_{e \text{ нов}} - 2h' - 2\sigma_K,$$

где $D_{e \text{ нов}}$ — наружный диаметр новой фрезы;

$\sigma = 0,1-0,25$ (по ГОСТу 9324-60 $\sigma = 0,15$) — учитывает удаление расчетного сечения от передней поверхности.

При неизвестных значениях $D_{e \text{ нов}}$ и σ величина $D_{t \text{ расч.}}$ находится по данным маркировки фрезы

$$D_{t \text{ расч.}} = \frac{m \cdot i}{\sin \omega_{\text{ расч.}}}$$

Шаг режущей спирали рассчитывается по формуле

$$T_{p.c} = \frac{\pi D_{t \text{ расч.}}}{\operatorname{tg} \omega_{\text{ расч.}}}$$

Измерение $T_{p.c}$ осуществляется следующим образом (рис. 16).

Сначала устанавливают нож штангенрейсмуса "Ш" на высоте центров прибора. Оправку со свободно посаженной на ней фрезой устанавливают в центрах прибора и закрепляют фиксатором "М" в отверстии диска "N". Фрезу поворачивают и устанавливают с помощью штангенрейсмуса таким образом, чтобы зуб фрезы в положении I индикатора находился на высоте центров. После этого фреза закрепляется на оправке гайкой "Г". Ножка индикатора устанавливается на переднюю грань зуба фрезы ближе к наружному диаметру, дается некоторый натяг, а стрелка индикатора совмещается с нулем поворотом шкалы. Затем, вращая рукоятку "Р", перемещают салазки с фрезой на возможное большее расстояние L , отмеряемое по линейке "Л", так что

индикатор относительно фрезы займет положение II, а отклонение стрелки покажет величину подъема Δ . Далее производят расчет центрального угла ε , соответствующего подъёму спирали Δ

$$\sin \varepsilon = \frac{2\Delta}{De},$$

и определяют шаг режущей спирали

$$T_{pc} = \frac{L \cdot 360^\circ}{\varepsilon}.$$

На том же приборе (рис. 16) производится измерение переднего угла β . Для этого нож штангенрейсмуса устанавливается на высоте центров прибора H_c и эта величина фиксируется. Затем фрезу поворачивают, а нож рейсмуса опускают пока передняя грань не займет горизонтальное положение (рис. 17). Фиксируется высота H_n и рассчитывается величина переднего угла $\sin \beta = \frac{2\Delta H}{De}$, где $\Delta H = H_c - H_n$.

Элементы стружечных канавок H , γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ (рис. 12) определяются по следующим данным:

$$H = h + \frac{K + K_1}{2} + 1,0;$$

для фрез со шлифованным профилем:

$$H = h + K + 0,5;$$

для фрез с нешлифованным профилем:

$$\gamma_1 = \frac{C}{1 - \sin \alpha_0}, \quad \text{где } C = 0,25 m$$

$$\gamma_2 = (0,2 + 0,3) m, \quad \gamma_3 = \frac{\pi(De - 2H)}{10 \cdot z}$$

$$\gamma = 25^\circ \text{ для } m \leq 9 \text{ и } \gamma = 22^\circ \text{ для } m > 9$$

§ 4. Изучение конструкции, расчет и измерение параметров долбяка

Долбяки предназначены для нарезания цилиндрических зубчатых колес с прямым и косым зубом наружного и внутреннего зацепления методом обкатки. В процессе резания долбяк и нарезаемое колесо представляют кинематическую пару и совершают согласованное движение.

Основные элементы конструкции и геометрии прямозубого долбяка представлены на рис. 18. Долбяк — это корригированное зубчатое цилиндрическое колесо, снабженное передними и задними углами, U зуба долбяка различают вершинную I и две боковые режущие кромки 2.

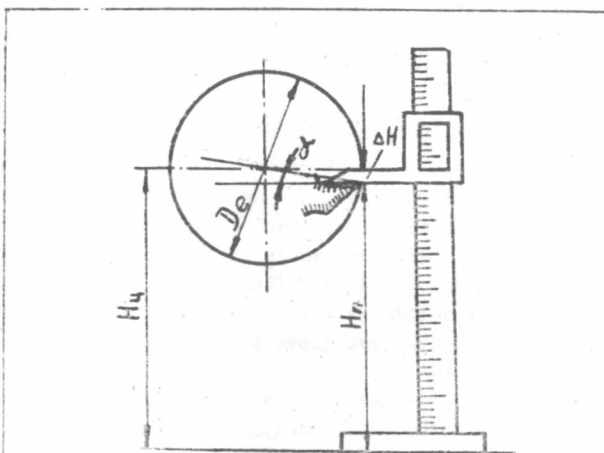


Рис. 17. Схема измерений для расчета переднего угла фрезы

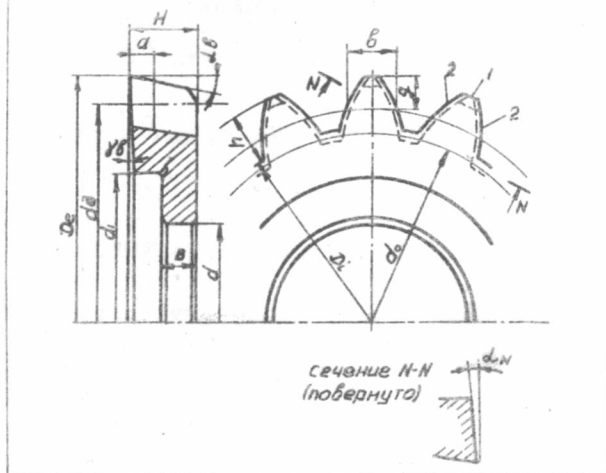


Рис. 18. Основные элементы конструкции и геометрии прямозубого долбяка

Переточка долбяка производится по передней поверхности. Поэтому расчетное (исходное) сечение, в котором размеры зубьев долбяка соответствуют размерам исходного контура зубчатой рейки нарезаемого колеса находится на некотором расстоянии "а" от вершины режущих зубьев. Величина "а" называется смещением исходного контура или осевой коррекцией и предназначена для увеличения срока службы долбяка. По мере переточек долбяка величина коррекции изменяется.

По ГОСТу 9323-60 чистовые зуборезные долбяки изготавливаются пяти типов (I + У) и трех классов точности (АА, А и В). Различают долбяки дисковые и хвостовые прямозубые и косозубые и часечные прямозубые. По классам точности рекомендуется следующее назначение долбяков: класса АА - для колес 6-й степени точности; класса А - для колес 7-й степени точности; класса В - для колес 8-й степени точности.

Дисковые прямозубые долбяки изготавливаются с модулями $m = I + I2$ мм и номинальными делительными диаметрами $d_g = 75; 100; 125; 160$ и 200 мм.

Основные размеры дисковых прямозубых долбяков с номинальными делительными диаметрами $d_g = 75$ и 100 мм по ГОСТу 9323-60 приведены в табл. 8, 9 (см. приложение).

Цель лабораторной работы - ознакомление с конструкцией долбяка, методами расчета и измерения его основных элементов.

Из м е р е н и е и р а с ч е т э л е м е н т о в п р я м о з у б о г о д о л б я к а

По клеймению и общим осмотрам находятс модуль m , число зубьев Z , угол зацепления α_0 .

При помощи штангенциркуля измеряют наружный диаметр \varnothing_e , внутренний диаметр \varnothing_i , посадочный диаметр d , диаметр выточки d_f , высоту долбяка H и ширину ступицы B (рис.18). Результаты измерений сопоставляются с табличными значениями параметров по ГОСТу 9323-60 (табл. 8,9 приложения).

Зубомером измеряется высота зуба долбяка h .

Высота головки зуба долбяка в исходном сечении h'_0 делается равной высоте ножки зуба нарезаемого колеса

$$h'_0 = h_{н.з.}$$

Высота ножки зуба долбяка h''_0 вычисляется по формуле

$$h''_0 = h_{г.з.} + c,$$

где $h_{a.з.}$ - высота головки зуба нарезаемого колеса;

$C = (0,25 + 0,3) \cdot m$ - величина радиального зазора.

Таким образом, $h'_o = h''_o$ и $h'_o = \frac{h}{2}$.

Коэффициент высоты головки зуба f' определяется расчетом по формуле

$$f' = \frac{h}{2m}$$

Обычно коэффициент $f' = 1,25$ при $m \leq 2,5$ и $f' = 1,3$ при $m \geq 2,75$.

Измерение заднего угла α_δ и угла заострения β_δ на вершинной кромке производится угломером, как показано на рис. 19.

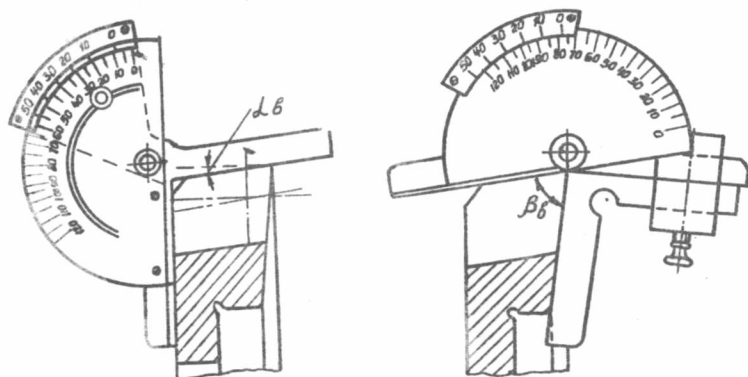


Рис. 19. Измерение заднего угла α_δ и угла заострения β_δ на вершинной кромке долбяка

Величина переднего угла определяется по формуле $\gamma_\delta = 90^\circ - (\alpha_\delta + \beta_\delta)$.

Делительный и основной диаметры определяются расчетом

$$d_g = m \cdot z; \quad d_o = m \cdot z \cdot \cos \alpha_o$$

Основной шаг t_o находится по формуле

$$t_o = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha_o$$

Измерение основного шага производится на инструментальном микроскопе. Предварительно микроскоп должен быть настроен таким

образом, чтобы нули градусной и минутной шкал окуляра были совмещены, а горизонтальная линия сетки окуляра совпадала с продольным перемещением столика.

Долбьяк устанавливается на предметный столик и один из зубьев подводится к вертикальной линии окуляра так, чтобы эта линия была касательной к эвольвенте зуба долбьяка в точке, лежащей ближе к наружному диаметру (точка А на рис. 20). При этом для наглядности измерения необходимо совместить точку перекрытия окуляра с точкой касания А. Линия $x-x$ в этом случае будет нормалью к эвольвенте зуба в точке А и касательной к основной окружности.

Эта же линия будет нормалью для эвольвенты соседнего зуба в точке В, лежащей ближе к основанию зуба. Расстояние АВ равно основному шагу t_0 , так как $t_0 = \sphericalangle DC$, а $\sphericalangle DC = \sphericalangle AB$.

Отметив положение микрометрического винта продольного перемещения в положении I-I и переведя столик в положение II-II, когда вертикальная линия окуляра будет касаться второго зуба, определим величину основного шага t_0 как разность показаний микрометрического винта в положениях I-I и II-II.

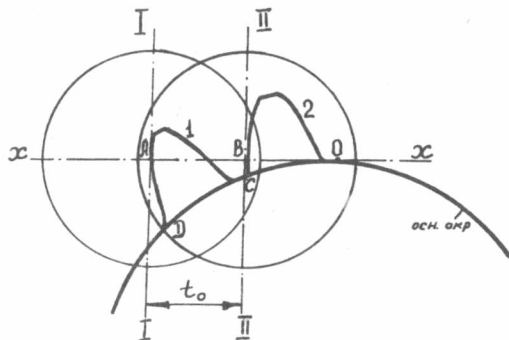


Рис. 20. Измерение основного шага долбьяка на инструментальном микроскопе

Определение коррекции "а" и коэффициента радиального смещения ξ' производится расчетом

$$De = m \cdot z + 2f'm + 2a \operatorname{tg} \alpha b,$$

откуда

$$a = \frac{De - m \cdot z - 2f'm}{2 \operatorname{tg} \alpha b}.$$

Величина "а", рассчитанная по приведенной формуле, в зависимости от количества произведенных переточек долбьяка и соответствующего расположения передней поверхности относительно плоскости исходного контура, может оказаться положительной, отрицательной или равной нулю.

Радиальное смещение профиля

$$\xi = a \operatorname{tg} \alpha b.$$

Коэффициент радиального смещения профиля в долях модуля

$$\xi' = \frac{\xi}{m}.$$

Далее определяются задний угол на боковых сторонах зубьев в нормальном сечении α_N и задний угол в сечении по делительному цилиндру $\alpha_{\delta.g}$.

$$\operatorname{tg} \alpha_N = \operatorname{tg} \alpha b \cdot \sin \alpha_0$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{\delta.g} = \operatorname{tg} \alpha b \cdot \operatorname{tg} \alpha_0.$$

Измерение толщины зуба по хорде на делительной окружности (хордальной толщины) в передней плоскости может производиться при помощи зубомера следующим образом (рис. 2I).

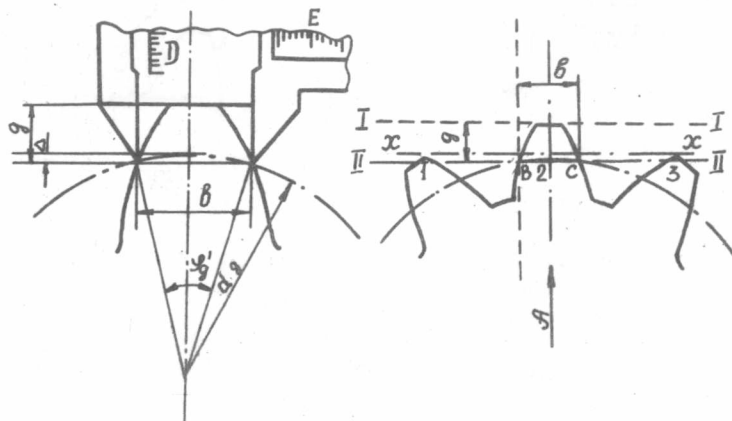


Рис. 2I. Измерение толщины зуба долбяка по хорде делительной окружности в передней плоскости

Рассчитывается величина " g ", представляющая расстояние от вершинной кромки до хорды на делительном диаметре

$$g = \frac{D_e - d_g}{2} + \frac{d_g}{2} \left(1 - \cos \frac{\varphi'_g}{2} \right),$$

где

$$\varphi'_g = \frac{\pi \cdot m + 4a \operatorname{tg} \alpha_{\delta.g}}{d_g}.$$

Высотная линейка зубомера по шкале " D " устанавливается на величину " g " и укрепляется. После этого, приложив зубомер к зубу долбяка, определяют по шкале " E " величину хорды " b " .

При измерении хордальной толщины на инструментальном микроскопе долбяк должен быть установлен так, чтобы вершины зубьев I и 3 совпадали с горизонтальной линией окуляра $x-x$, что будет указывать на совпадение оси измеряемого зуба 2 с направлением поперечного перемещения столика.

Совместив горизонтальную линию на окуляре с вершиной зуба (положение I-I на рис. 21), фиксируют показание лимба поперечного перемещений столика. После этого долбяк передвигают в положение II-II по направлению стрелки А на величину " g ", отсчитывая её по лимбу поперечных перемещений столика.

Совместив затем продольным перемещением столика пересечение вертикальной и горизонтальной визирных линий перекрестие окуляра с профилем зуба в точках В и С, снимают соответствующие показания лимба микровинта. Разность между этими показаниями дает величину хорды " b ". Для получения более точных данных следует производить не менее 3-х замеров.

§ 5. Исследование сил резания при точении

Процесс резания материалов сопровождается противодействующими силами, знание которых необходимо для выполнения расчетов на прочность, жесткость и виброустойчивость элементов конструкций станков и режущих инструментов и наиболее выгодных режимов резания.

Схема сил, действующих в процессе токарной обработки, приведена на рис. 22. Сила R представляет здесь равнодействующую силу резания, которую можно разложить на три составляющие: P_z - тангенциальную, действующую в плоскости резания в направлении главного движения; P_x - осевую составляющую, действующую вдоль оси заготовки в направлении, противоположном направлению подачи; P_y - радиальную, действующую перпендикулярно плоскости, образованной векторами сил P_z и P_x в направлении от заготовки на резец.

Величина равнодействующей силы R может быть выражена через ее составляющие зависимость

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2} .$$

Сила P_z является наибольшей по величине, определяет крутящий момент $M_{кр}$ и нагружает коробку скоростей станка и резец.

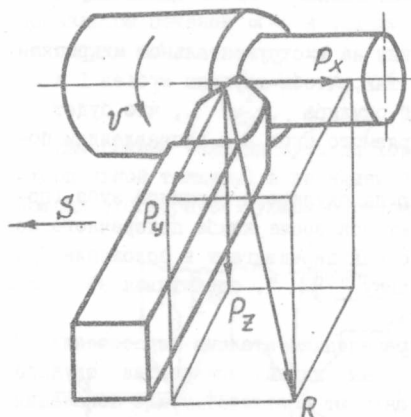


Рис. 22. Схема сил при точении проходным резцом

Сила P_y определяет отжим резца от заготовки и прогиб самой заготовки.

Сила P_x нагружает механизм подачи станка.

Соотношение сил P_z , P_y и P_x не является постоянным, а зависит от геометрии резца, его притупления, режима резания и других факторов. Так, например, уменьшение главного угла в плане φ вызывает увеличение отношения P_y/P_z ; увеличение подачи ведет к возрастанию отношения P_x/P_z . Возникающие в процессе резания силы могут быть рассчитаны по теоретическим формулам или измерены экспериментально.

На практике пользуются опытными зависимостями составляющих сил резания P_z , P_y и P_x , которые имеют степенной характер

$$P_z = C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} S^{y_{Pz}};$$

$$P_y = C_{Py} \cdot t^{x_{Py}} S^{y_{Py}};$$

$$P_x = C_{Px} \cdot t^{x_{Px}} S^{y_{Px}}.$$

Формулы такого вида даны в нормативах по режимам резания. В зависимости от заданных условий обработки находятся значения x_p , y_p , C_p . При этом коэффициенты C_p представляют, например, для силы P_z , в форме

$$C_{Pz} = C'_{Pz} \cdot K_{Pz},$$

где C'_{Pz} - коэффициент, соответствующий определенным условиям обработки;

K_{Pz} - поправочный коэффициент, учитывающий измененные условия обработки по сравнению с теми, при которых был найден коэффициент C'_{Pz} .

Экспериментальное определение сил производят динамометрами.

В зависимости от типа датчиков, преобразующих упругие перемещения механических частей динамометров в электрические, динамометры подразделяются на пьезо-электрические, ёмкостные, индуктивные и другие.

В тех случаях, где не требуется измерение быстроменяющихся сил резания, могут также применяться механические и гидравлические динамометры. В работе используется трехкомпонентный электроиндуктивный динамометр.

Лабораторная работа знакомит с методикой экспериментального измерения сил резания при точении, с обработкой результатов опытов, с соответствующими приборами и оборудованием.

Работа проводится под непосредственным руководством лаборанта.

О п и с а н и е т р е х к о м п о н е н т н о г о э л е к т р о и н д у к т и в н о г о д и н а м о м е т р а

На рис. 23 показана схема механической и электрической частей прибора.

Механическая часть динамометра представляет упругую систему, состоящую из бруса-лльйки 2, связанной с корпусом прибора I симметричными стойками 3 и 4. В передней части лльйки закрепляется резец 5 винтами 9. В корпусе динамометра с трех сторон с помощью бронзовых втулок смонтированы электроиндуктивные датчики 6, 7, 8, представляющие из себя катушки, намотанные на "Ш" - образные стальные сердечники кольцевой формы. Разомкнутые стороны магнитопроводов датчиков обращены к лльейке, которая выполняет роль якоря.

Между лльейкой и сердечниками установлен зазор $0,3 + 0,5$ мм.

Под действием вертикальной составляющей силы P_z лльейка 2 изгибается в вертикальной плоскости, что приводит к изменению зазора и соответственно к изменению индуктивного сопротивления и силы тока в датчике 6.

Под действием радиальной составляющей P_y стойки 3 и 4 изгибаются как балки, заделанные с двух концов. Лльейка 2 перемещается параллельно своей оси на расстояние, пропорциональное величине P_y . Это перемещение улавливается датчиком 7.

Осевая составляющая P_x вызывает изгиб лльейки 2 в горизонтальной плоскости, что приводит к изменению зазора и индуктивности в датчике 8.

Электрическая схема прибора представляет собой три независимых

мостика для замера ρ_z , ρ_y , ρ_x , смонтированных в пульте управления.

Два плеча каждого мостика имеют индуктивные сопротивления в виде датчика (L_1, L_3, L_5) и задатчика (L_2, L_4, L_6), а два других плеча — омические сопротивления R_4 и R_5 .

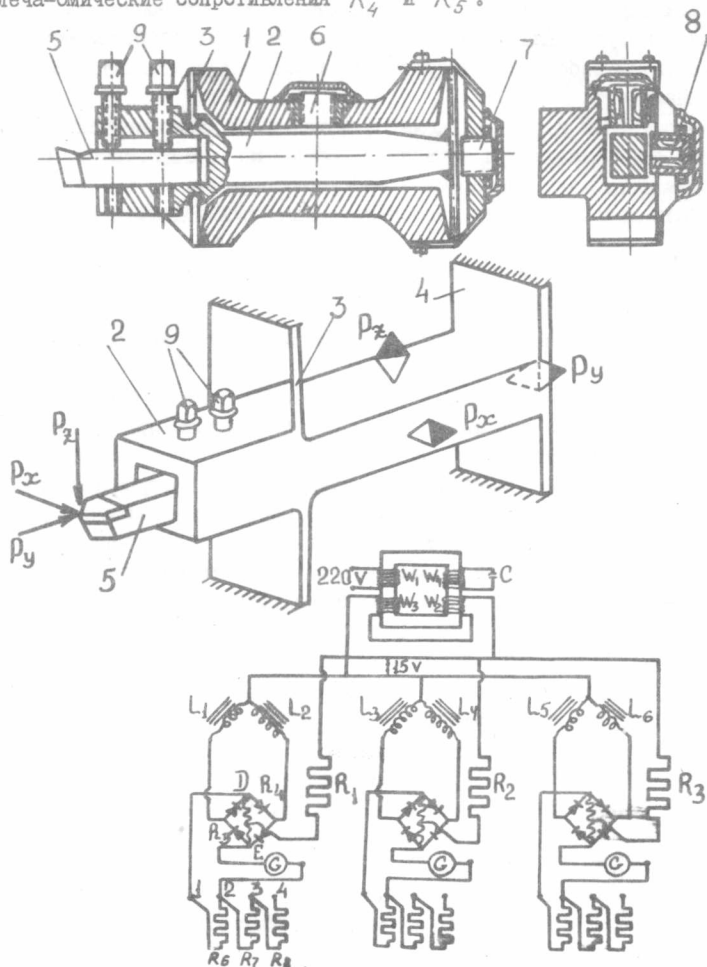


Рис. 23. Трехкомпонентный электроиндуктивный динамометр

Плечи мостов питаются переменным током со стабилизированным напряжением 15 вольт.

Для питания гальванометров током постоянного направления в электрическую цепь включены полупроводниковые выпрямители.

Изменяя чувствительность гальванометров включением в цепь добавочных сопротивлений R_6 , R_7 , R_8 , можно получить четыре диапазона измерения.

Датчики динамометра подсоединяются к мостикам с помощью многожильного кабеля. Задатчики смонтированы в пульте и представляют из себя такие же дроссели, что и датчики.

Для приведения каждого мостика в равновесие, индуктивное сопротивление задатчиков регулируется изменением зазора (рис. 24) между сердечником катушки 2 и якорем 1, осуществляемое поворотом ручки 3. Тонкая регулировка зазора обеспечивается за счет разности шагов резьбовых пар 12 x 0,956 и 6 x 0,905. Один оборот ручки 3 соответствует изменению зазора на 0,051 мм.

Изменение сопротивления датчиков под действием сил резания вызывает разбаланс мостов и появление токов в диагоналях $D\mathcal{E}$, сила которых фиксируется гальванометрами. Показания гальванометров по тарифовочным графикам переводятся в килограммы (рис. 25).

Э к с п е р и м е н т а л ь н о е о п р е д е л е н и е с и л

Для нахождения зависимостей составляющих сил резания P_z , P_y , P_x от подачи и глубины резания проводят две серии опытов.

Первая серия проводится при постоянной подаче $S = S_0$ и постоянной скорости резания. Определяется частная зависимость.

$$P = f(t).$$

Вторая - при постоянных скорости и глубине резания $t = t_0$. Находится частная зависимость $P = \varphi(S)$.

Во время опытов снимают показания гальванометров, а затем проводят обработку результатов.

В задачу лабораторной работы входит также исследование влияния переднего угла на силы резания.

Опыты проводятся при постоянной подаче, глубине и скорости резания. Устанавливаются резцы с различными передними углами.

О б р а б о т к а р е з у л ь т а т о в о п ы т о в

По средним показаниям гальванометров, пользуясь тарифовочными графиками, находят составляющие силы резания P_z , P_y , P_x .

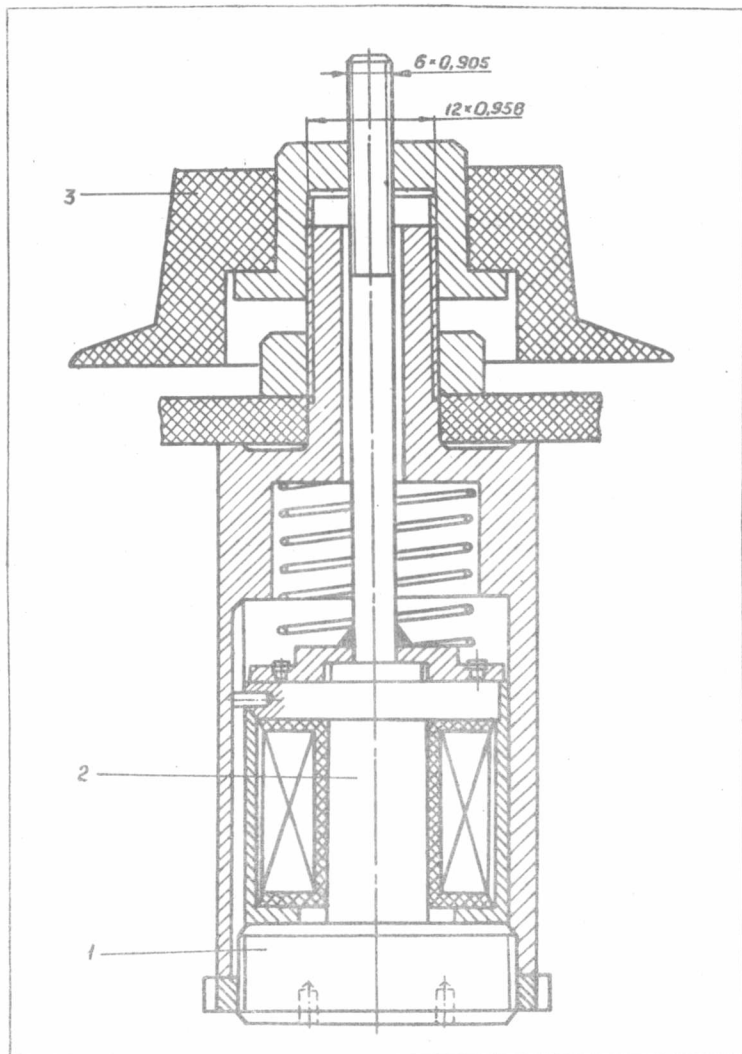


Рис. 24. Задатчик динамометра

Затем в двойной логарифмической сетке строят графики частных зависимостей

$$\begin{aligned} P_z &= f_1(t); & P_z &= \varphi_1(S); \\ P_y &= f_2(t); & P_y &= \varphi_2(S); \\ P_x &= f_3(t); & P_x &= \varphi_3(S). \end{aligned}$$

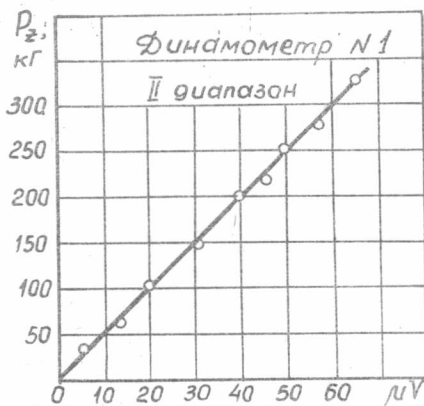


Рис. 25. Тарировочный график

Эти зависимости представляются в двойной логарифмической сетке в виде прямых линий (рис. 26), аналитическое выражение которых имеет вид

$$P = C_1 \cdot t^{x_p}; \quad P = C_2 \cdot S^{y_p}.$$

Показатели степеней находятся как тангенсы углов наклона прямых к оси абсцисс, т.е. $x_p = \operatorname{tg} \alpha_1$, $y_p = \operatorname{tg} \alpha_2$.

Коэффициенты C_1 и C_2 находятся по графикам соответственно при значениях $t = 1$ мм и $S = 1$ мм/об.

По этим частным зависимостям отыскиваются общие в виде

$$P = C_p \cdot t^{x_p} S^{y_p},$$

где коэффициент C_p определяется из приведенной формулы по известным значениям P , t и S для каждого опыта. За окончательное значение коэффициента C_p принимается его средне-арифметическая величина из 3 + 5 рассчитанных.

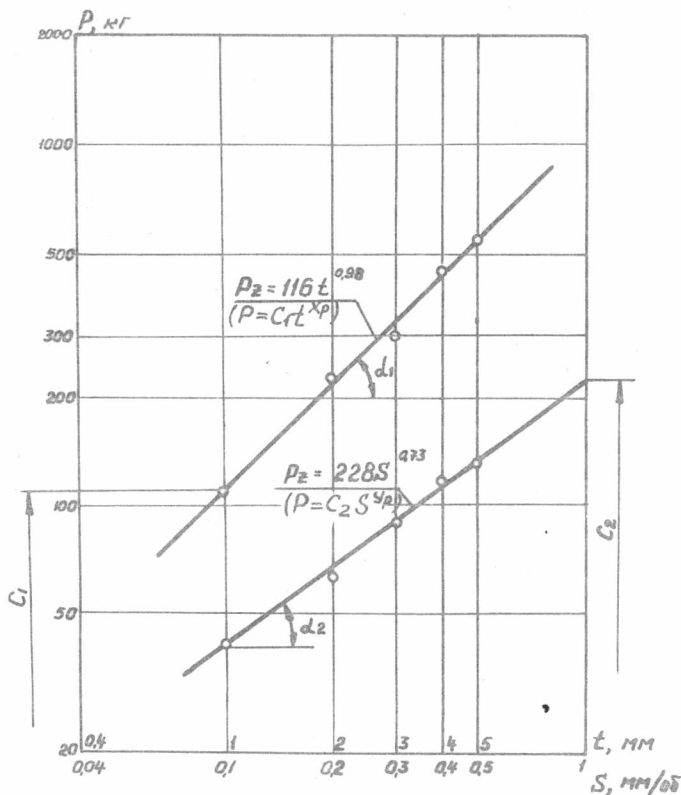


Рис. 26. Графики частных зависимостей в логарифмических координатах $P_z = f(t)$ и $P_z = f(S)$

Показатели степеней x_p , y_p берутся из соответствующих формул частных зависимостей.

Рассмотрим пример. Обрабатывается изделие из стали 20, $\sigma_B = 40$ кг/мм. Обработка ведется проходным резцом. Результаты опытов представлены в таблице.

Таблица

№ опыта	t , мм	S , мм/об.	P_z , кг
I	5		550
2	4		450
3	3	0,84	300
4	2		230
5	I		116
6		0,1	42
7		0,2	64
8	2	0,3	90
9		0,4	123
10		0,5	135

По этим данным для P_z построены графики (рис. 26), на основании которых найдены формулы

$$P_z = 116 t^{0,98} \quad \text{при } S = S_0 = 0,84 \text{ мм/об.};$$

$$P_z = 228 S^{0,73} \quad \text{при } t = t_0 = 2 \text{ мм.}$$

По данным опытов 2,5,7,10 (взятых произвольно) рассчитывается коэффициент C_{Pz}

$$C_{Pz} = \frac{C_{Pz2} + C_{Pz5} + C_{Pz7} + C_{Pz10}}{4},$$

где
$$C_{Pz2} = \frac{P_{z2}}{t_2^{0,98} S_2^{0,73}} = \frac{450}{4^{0,98} \cdot 0,84^{0,73}} = 131$$

$$C_{Pz} = \frac{131 + 132 + 105 + 114}{4} = 120,5$$

Общее уравнение запишется в следующем виде:

$$P_z = 120,5 \cdot t^{0,98} S^{0,73}.$$

Аналогично определяются формулы для P_y и P_x .

По результатам исследований сил резания в зависимости от величины переднего угла γ и главного угла в плане φ строятся графики в простых координатах по типу, представленному на рис. 27.

На основании проведенных силовых исследований для максимального и минимального сечения среза определяются:

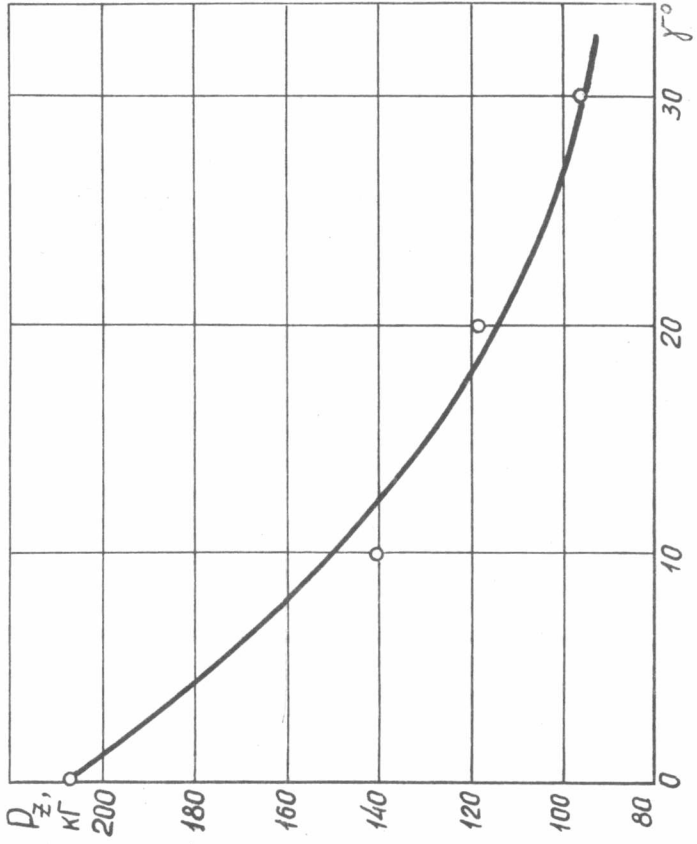


Рис. 27. Зависимость силы P_z от величины переднего угла γ

удельное давление резания

$$\rho_{y\delta} = \frac{\rho_z}{t \cdot S} \quad (\text{кг/мм}^2);$$

соотношение составляющих сил резания

$$\rho_z : \rho_y : \rho_x = 1 : \left(\frac{\rho_y}{\rho_z}\right) : \left(\frac{\rho_x}{\rho_z}\right);$$

мощность, затраченная на резание

$$N_e = \frac{\rho_z \cdot v}{60 \cdot 102} \quad (\text{кВт}).$$

§ 6. Исследование осевой силы и крутящего момента при сверлении

В процессе работы сверло находится под действием сил, представленных на рис. 28. На каждую режущую кромку действует равнодействующая сила резания R , которую можно разложить на три составляющие: ρ_z , ρ_y и ρ_x . На поперечную кромку действует сила $P_{п.к.}$, направленная вверх вдоль оси сверла x , и пара сил, создающая момент $M_{п.к.}$ в плоскости, перпендикулярной оси сверла.

На направляющие ленточки сверла действуют силы трения P_1 , направленные по оси Z и создающие момент трения M_l в плоскости, перпендикулярной оси сверла, и силы трения P_l , направленные вдоль оси X .

При условии правильной (симметричной) заточки главных режущих кромок равнодействующая сил, действующих по направлению оси y , равна нулю, так как в этом случае силы ρ_y , равные по величине и противоположные по направлению, уравниваются.

Равнодействующая всех сил, действующих вдоль оси сверла, является силой подачи или осевой силой. На основании рис. 28 можно записать

$$P = 2\rho_x + P_{п.к.} + 2P_l.$$

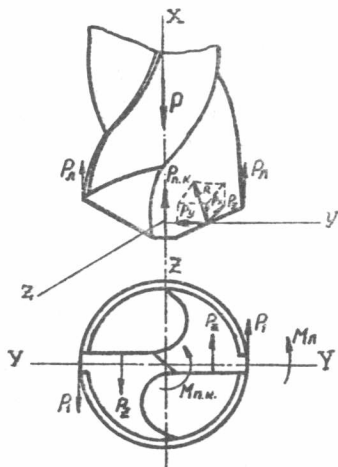


Рис. 28. Силы и моменты, действующие на сверло

Суммарный крутящий момент M , действующий на сверло, складывается из момента от сил P_z , момента $M_{п.к.}$ и момента $M_{л}$ от сил трения на направляющих ленточках.

$$M = M_{P_z} + M_{п.к.} + M_{л.}$$

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

Цель работы - экспериментальное исследование крутящего момента (M) и осевой силы (P) в зависимости от диаметра сверла и подачи для данного материала. Кроме того, выясняют какое влияние на крутящий момент и осевую силу оказывают подточка поперечной кромки и свойства обрабатываемого материала.

Лабораторная работа проводится под руководством лаборанта.

Измерительная аппаратура

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

На рис. 29 показан общий вид установки, состоящей из механической части 1, электрической части, смонтированной в пульте управления 2, и двух самописцев 3.

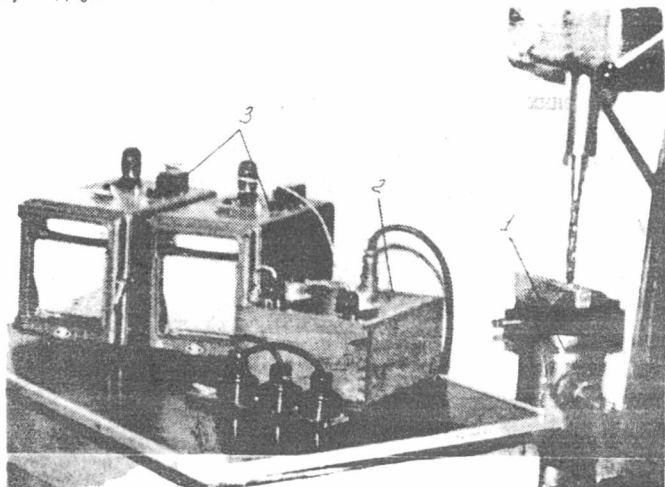


Рис. 29. Общий вид установки для измерения силы подачи и крутящего момента при сверлении

Механическая часть динамометра (рис. 30) состоит из стержня I, связанного посредством упругих круглых пластин 4, 5, 4^I и 5^I со втулкой 2, которая в свою очередь, соединена с корпусом несколькими прямоугольными пластинами 7. В верхней части стержня I укреплены тиски 8 для зажима заготовок. В корпусе 6 установлены электроиндуктивные датчики D_p и D_m , представляющие собой катушки, намотанные на стальные сердечники кольцевой формы. Разомкнутые стороны магнитопроводов обращены у датчика D_p к стержню I, у датчика D_m к стержню 3, связанному со втулкой 2. Между сердечниками датчиков и стержнями I и 3, выполняющими роль якорей, устанавливается зазор $\Delta = 0,3 - 0,5$ мм.

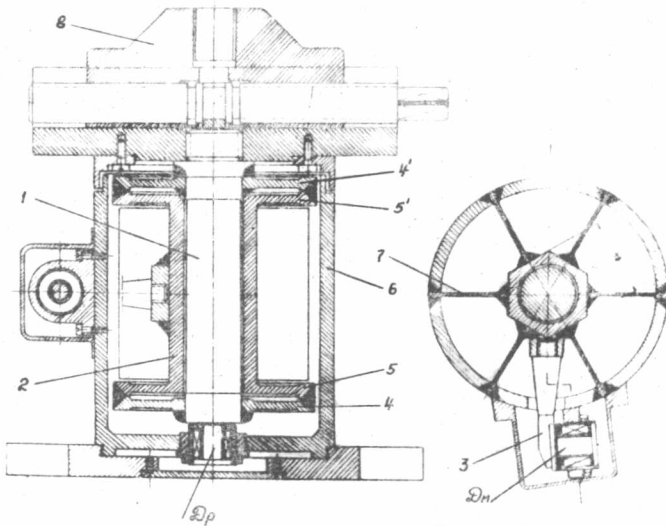


Рис. 30. Механическая часть сверлильного динамометра

Под действием осевой силы P круглые пластины 4, 5, 4^I и 5^I прогибаются, что приводит к пропорциональному перемещению стержня в осевом направлении, изменению зазора в датчике D_p и соответствующему изменению его индуктивности.

Под действием крутящего момента M изгибаются в горизонтальной плоскости пластины 7, работающие как балки, заделанные с двух концов. При этом происходит поворот втулки 2 относительно неподвижного корпуса 6. Величина поворота регистрируется датчиком DM .

Отсутствие контактирующих элементов и трения поверхностей, независимость упругих перемещений обеспечивают необходимую точность измерения осевой силы и крутящего момента.

Электрическая схема прибора (рис. 31) представляет собой два независимых мостика. Два плеча каждого мостика имеют индуктивные сопротивления в виде датчика ($L_1; L_3$) и задатчика (L_2, L_4), а два других плеча — омические сопротивления (R_3, R_4, R_5, R_6). Задатчики служат для приведения моста в равновесие.

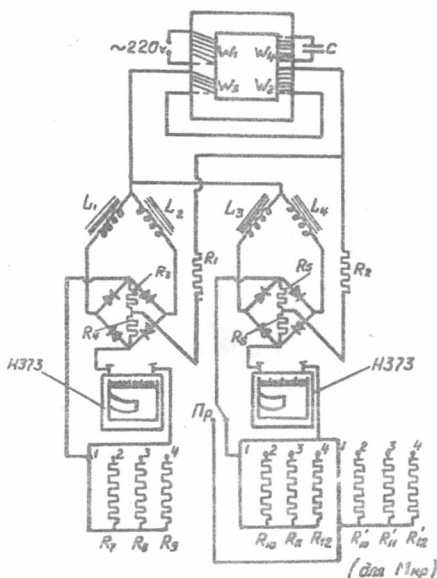


Рис. 31. Электрическая часть динамометра

Изменение сопротивления датчиков при резании вызывает разбаланс моста и появление тока в диагоналях.

Сила тока фиксируется с помощью самолишущих микроампермилли-вольтметров Н373, которые питаются от сети переменного тока напря-

жением 127 или 220 вольт с частотой 50 герц. Высокая точность регистрации малых токов и напряжений достигается за счет фотокомпенсационного принципа. При этом пределы измерений изменяются переключателем, установленным в верхней части кожуха. При выполнении лабораторной работы используется шкала с пределом измерений до 150 mV , а в некоторых случаях (при больших диаметрах сверл и подачах) - $0,5 \text{ V}$.

Для проведения измерений тумблер на верхней части кожуха должен быть переключен в положение "измерение"; при этом перед каждым опытом по сверлению необходимо удостовериться, что стрелки приборов показывают "нуль". Настройка на "нуль" выполняется вращением ручек соответствующих задатчиков на пульте управления. Запись показаний производится чернилами на диаграммной бумаге в криволинейных координатах. Для привода диаграммной бумаги применяется синхронный двигатель, который включается специальным тумблером на верхней части кожуха.

Примеры диаграмм крутящего момента и осевой силы, полученных при сверлении, приведены на рис. 32.

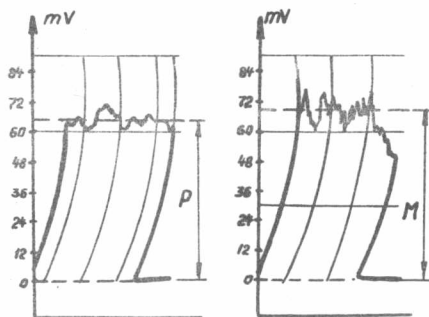


Рис. 32. Диаграммы осевой силы и крутящего момента при сверлении:

$$d = 18 \text{ мм}, \quad S = 0,21 \text{ мм/об.}$$

По средним значениям ординат этих диаграмм при установившемся процессе с помощью тарировочных графиков находятся численные значения $M(\text{кг. м})$ и $P(\text{кг})$.

Установление зависимостей крутящего момента и осевой силы от диаметра сверла и подачи

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

В первой серии, при одном и том же диаметре сверла $d = d_0 = const$ но различных подачах $S = S_1, S_2, S_3 \dots$ измеряются крутящий момент и осевая сила P . Результаты измерений дают возможность найти функции $M = f_1(S)$ и $P = \varphi_1(S)$.

Во второй серии в результате измерения величин M и P при одной и той же подаче $S = S_0 = const$, но разных диаметрах сверл $d = d_1, d_2, d_3 \dots$ находим зависимость $M = f_2(d)$ и $P = \varphi_2(d)$. Все указанные зависимости обычно описываются степенными функциями, а именно:

$$P = C_1 d^{x_P} \text{ и } P = C_2 S^{y_P};$$

$$M = C_3 d^{x_M} \text{ и } M = C_4 S^{y_M}$$

Графическое представление этих функций в двойных логарифмических координатах дает прямые линии, угловые коэффициенты которых будут равны показателям степеней, т.е. $x_P = \operatorname{tg} \alpha$, $y_P = \operatorname{tg} \alpha_2$ (рис. 33) и аналогичные зависимости для x_M и y_M .

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

Найденные таким образом частные зависимости позволяют получить обобщенные формулы

$$P = C_P \cdot d^{x_P} S^{y_P}$$

$$M = C_M \cdot d^{x_M} S^{y_M}$$

Показатели степеней x и y здесь остаются те же, что и в формулах частных зависимостей. Коэффициенты C_P и C_M определяются как средние-арифметические величины для 3-5 опытов, взятых произвольно. Например,

$$C_P = \frac{C_{P1} + C_{P2} + C_{P3} + C_{P4} + C_{P5}}{5},$$

где

$$C_{P1} = \frac{P_1}{d_1^{x_P} S_1^{y_P}}; \quad C_{P2} = \frac{P_2}{d_2^{x_P} S_2^{y_P}}$$

и т.д.

Аналогично рассчитывается коэффициент C_M .

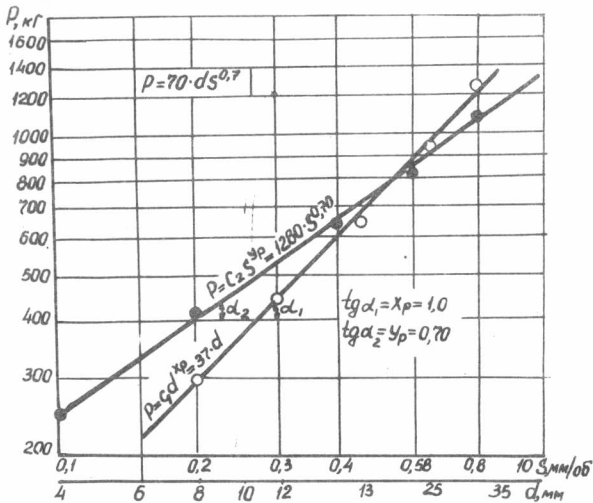


Рис. 33. Графики осевой силы в логарифмических координатах

Исследование влияния поперечной кромки сверла на осевую силу

Поперечная кромка оказывает большое влияние на осевую силу и меньше на крутящий момент. Для установления влияния поперечной кромки на осевую силу проводятся опыты сверлом одного диаметра при сверлении в сплошном материале и при рассверливании предварительно подготовленного отверстия с 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. 34) и нахождения процентного отношения

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

В этой формуле $P_{п.к.}$ представляет разность между осевой силой при сверлении в сплошном материале и при рассверливании

$$P_{п.к.} = P_1 - P_2$$

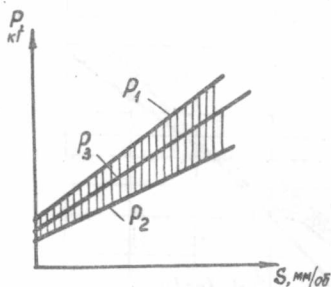


Рис. 34. Графики осевой силы при сверлении:
 1 — в сплошном материале;
 2 — материала с предварительно подготовленным отверстием;
 3 — сверлом с подточенной поперечной кромкой

обычной конструкции и с подточенной поперечной кромкой $P_n = P_1 - P_3$.

Исследование влияния свойств обрабатываемого материала на крутящий момент и осевую силу

Для установления влияния свойств обрабатываемого материала на

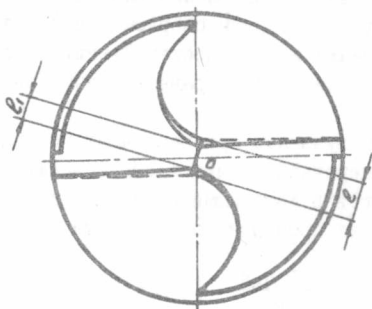


Рис. 35. Подточка поперечной кромки сверла:

l — длина поперечной кромки без подточки;
 l_1 — длина поперечной кромки с подточкой

Поскольку полностью устранить вредное влияние поперечной кромки при сверлении в сплошном материале не представляется возможным, на практике осуществляют подточку с целью уменьшения её длины (рис. 35).

Проведя опыты сверлом с подточенной поперечной кромкой при различных подачах, строят график зависимости осевой силы (P_3 рис. 34) и рассчитывают коэффициент ξ

$$\xi = \frac{P_n}{P_1} \cdot 100\%$$

В этой формуле P_n представляет собой разность между осевой силой при работе сверлом

обычной конструкции и с подточенной поперечной кромкой $P_n = P_1 - P_3$.
 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 коэффициенты

$$K_p = \frac{P_{обр. мат.}}{P_{стали}}$$

$$K_m = \frac{M_{обр. мат.}}{M_{стали}}$$

§ 7. Исследование температуры резания методом
естественной термопары

При обработке материалов резанием почти вся механическая энергия, затраченная на пластическую деформацию срезаемого слоя и преодоление сил трения по передней и задней поверхности инструмента, превращается в тепло. Источниками тепла являются зона контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента и зона контакта главной задней поверхности инструмента с обрабатываемой деталью. Указанные зоны расположены в непосредственной близости от главной режущей кромки инструмента, и поэтому вызывают ее интенсивный нагрев и снижение прочностных и режущих свойств, что в значительной мере определяет стойкость и производительность инструмента. Поэтому важно знать температуру, наблюдающуюся в зоне резания, и характер её изменения при различных условиях обработки с тем, чтобы иметь возможность ее регулировать и назначать наиболее производительные режимы обработки. Для определения температуры резания применяют ряд методов. Наиболее простым и широко распространенным является метод естественной термопары, с помощью которого измеряется некоторая средняя температура в зоне контакта инструмента с деталью и стружкой.

Лабораторная работа знакомит с измерением температуры по методу естественной термопары, с соответствующими приборами и оборудованием, с методикой исследования температуры резания и с обработкой экспериментальных данных применительно к токарной обработке деталей.

Лабораторная работа проводится под руководством лаборанта.

С х е м а и з м е р е н и я т е м п е р а т у р ы
р е з а н и я

Естественной термопарой является режущий инструмент и обрабатываемая деталь (рис. 36).

Спаем термопары служит зона контакта резца с деталью и стружкой. В цепь "деталь-резец" включается милливольтметр I, который регистрирует в милливольтках величину электродвижущей силы, возникающей вследствие нагрева спая термопары (зоны контакта) в процессе резания. Щеточное устройство 2 осуществляет контакт подводящего провода с вращающейся деталью.

Во избежание возникновения паразитной термопары между деталью и щеткой, щетка изготавливается из материала детали. Резец и деталь изолированы от станка.

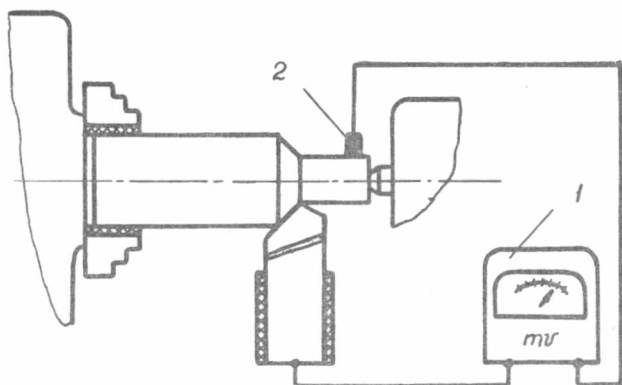


Рис. 36. Схема измерения температуры резания методом естественной термопары

Для перевода показаний милливольтметра в градусы производится градуировка рабочего милливольтметра с естественной термопарой в электрической печи (рис. 37).

В расплавленный алюминий ванны 2 опускаются естественная термопара, состоящая из стружки обрабатываемого материала 3 и резца 6,

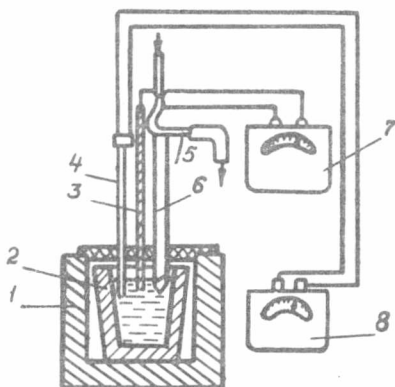


Рис. 37. Схема градуировки термопары "резец - деталь"

и контрольная хромель-алюмелевая термопара 4. Контрольная термопара подсоединяется к милливольтметру, проградуированному в градусах, а естественная термопара - к рабочему милливольтметру 7. К свободному концу резца припаяна латунная трубка 5, через которую проходит охлаждающая вода для поддержания в месте спая постоянной температуры.

По мере нагрева или охлаждения алюминиевой ванны через определенные промежутки времени фиксируется ее температура по показаниям контрольной термопары и показаниям рабочего милливольтметра. На основании полученных данных строится тарировочный график (рис. 38).

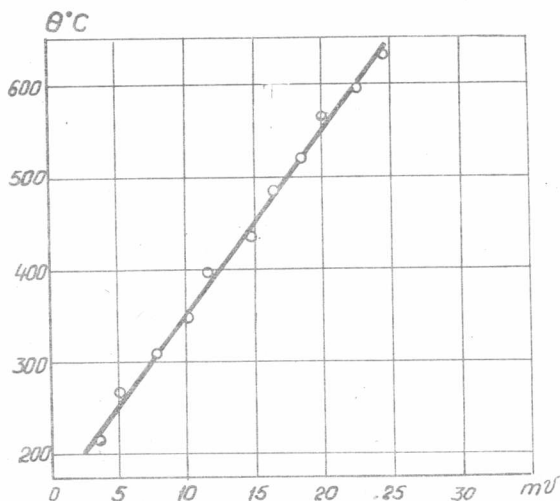


Рис. 38. Тарировочный график

С помощью тарировочного графика значения милливольт можно перевести в градусы C .

При проведении лабораторной работы ставится задача при заданных условиях обработки найти экспериментальную зависимость температуры резания от элементов процесса резания (скорости, подачи и глубины резания). Для этого проводятся исследования зависимости температуры:

- от скорости резания при постоянной подаче и глубине резания;
- от подачи при постоянной скорости и глубине резания;
- от глубины резания при постоянной скорости резания и подаче.

При определении зависимости температуры резания от скорости для каждой из заданных значений $V_1, V_2, V_3 \dots$ скорости резания фиксируется по милливольтметру соответствующая температура в милливольтках. Затем значения милливольт по тарировочному графику переводятся в градусы C и в двойной логарифмической сетке строится график зависимости " $\theta^{\circ} - V$ " (рис. 39).

На основании графика находится частная зависимость $\theta^{\circ} = C_2 V$.

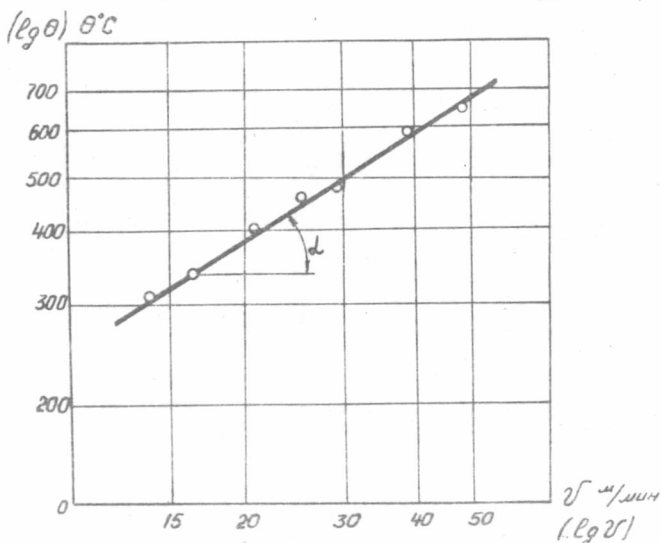


Рис. 39. График зависимости температуры резания от скорости резания

Показатель степени определяется по графику через тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс $x = \operatorname{tg} \alpha$.

Подобным же образом определяются частные зависимости

$$\theta^{\circ} = C_2 S^4 \text{ и } \theta^{\circ} = C_3 t^2$$

На основании частных зависимостей находится общая зависимость температуры резания от элементов процесса резания

$$\theta^{\circ} = C_0 V^x S^4 t^2$$

Значение коэффициента C_0 определится исходя из приведенной формулы по известным значениям θ° , V , S и t для каждого опыта. За окончательное значение коэффициента C_0 принимается среднее значение из 3 + 4-х рассчитанных.

Каждому инструментальному материалу свойственна своя температура теплостойкости, выше которой инструмент теряет свои режущие свойства. Так, для быстрорежущих сталей температура теплостойкости $\theta_T^{\circ} = 550 + 650^{\circ}\text{C}$; для вольфрамкобальтовых твердых сплавов $\theta_T^{\circ} = 800 + 900^{\circ}\text{C}$; для титанкобальтовых твердых сплавов $\theta_T^{\circ} = 900 + 1000^{\circ}\text{C}$

и для минералокерамических твердых сплавов $\theta_r = 1100 + 1200^\circ\text{C}$.

Если в качестве допустимой температуры задаться соответствующей величиной температуры теплостойкости, то на основании температурной зависимости можно вывести формулу для допустимой скорости резания для данного инструментального материала в виде:

$$V_{\text{доп}} = \frac{\left(\frac{\theta_r}{C\theta}\right)^{\frac{1}{x}}}{t^{\frac{1}{z/x}} S^{\frac{1}{y/x}}}$$

Зная марку инструментального материала, требуется найти формулу для расчета допустимой скорости резания и по заданным значениям t и S определить численные значения этой скорости.

§ 8. Исследование остаточных поверхностных напряжений

В процессе обработки резанием под воздействием возникающих сил и температуры резания в поверхностном слое формируются остаточные напряжения — растягивающие и сжимающие. Те и другие нежелательны, так как снижают усталостную прочность деталей. Особенно неблагоприятны растягивающие напряжения. Поэтому стараются выбирать такие условия обработки, которые бы позволили снизить их величину или способствовали бы формированию сжимающих остаточных напряжений.

Отсюда и появляется необходимость исследования величины и знака остаточных поверхностных напряжений при обработке различных материалов при разных условиях обработки.

Лабораторная работа дает понятие о методике исследования и расчета величины и знака остаточных напряжений и проводится под руководством лаборанта.

М е т о д и к а и с с л е д о в а н и я о с т а т о ч н ы х п о в е р х н о с т н ы х н а п р я ж е н и й

Если кольцо после наружной токарной обработки разрезать по образующей, а затем каким-то способом снять с поверхности тот слой, в котором наведены остаточные напряжения, то диаметр полученного кольца с учетом снятого слоя изменится. Изменение диаметра кольца связано как с величиной, так и со знаком остаточных напряжений. На этом принципе и основана методика определения остаточных напряжений.

Наиболее удобным методом удаления отдельных наружных слоев на образце является метод травления (анодного растворения).

Для анодного растворения сталей используется электролит следующего состава: ортофосфорная кислота - 65 + 75 %; серная кислота - 10 + 15%; хромовый ангидрид - 5%; вода - остальное.

Для удобства травления подвергают не всю наружную поверхность кольца, а только до половины диаметра.

Поверхности кольца, не подлежащие травлению, покрывают защитным перхлорвиниловым лаком. Кольцо 2 закрепляется в державке 3 в корпусе 6.

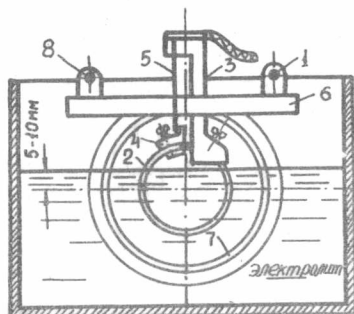


Рис. 40. Схема установки для травления поверхностных слоев исследуемого кольца

К корпусу же 6 крепится и кольцо 7, внутренняя поверхность которого армирована свинцом. Державка 3 и кольцо 7 изолированы друг от друга. К державке 3 и к кольцу 2 через штангу 1 подводится анодное напряжение, а к кольцу 7 через штангу 8 - катодное напряжение. На испытуемое кольцо 2 закрепляется лапка 4, которая касается пластинчатой пружины 5. На пружину 5 наклеены тензодатчики, связанные с тензометрическим прибором.

Корпус 6 установлен в электролитической ванне так, чтобы центр испытуемого кольца 2 погружался в электролит на 5 + 10 мм. В процессе анодного растворения изменение диаметра кольца через пластинчатую пружину 5 и тензодатчики фиксируется тензометрическим прибором. По окончании травления измеряется толщина стравленного слоя металла и фиксируется время травления. Если температура электролита не изменяется в процессе травления, то величина стравленного слоя пропорциональна времени опыта. Зная промежутки времени, через которые фиксировалось изменение диаметра ΔD , можно всегда для этих промежутков подсчитать соответствующую толщину стравленного слоя Δa . По полученным данным строят графическую зависимость $\Delta D = f(\Delta a)$ (см. рис. 41), которая позволит определить отношение $\frac{\Delta D}{\Delta a}$ для любого промежутка времени через тангенс угла " φ " наклона касательной к оси абсцисс в любой точке кривой.

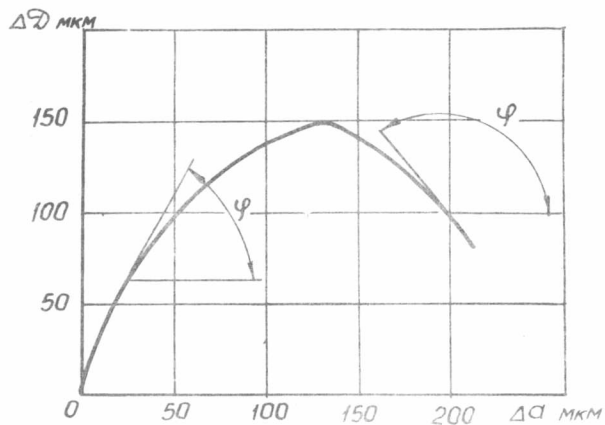


Рис. 41. График зависимости изменения диаметра кольца от толщины травленного слоя металла

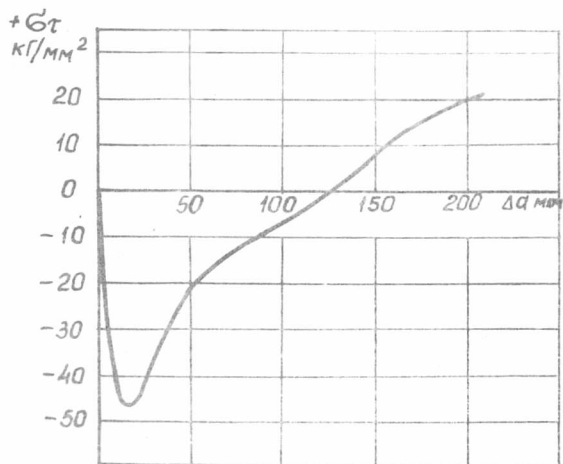


Рис. 42. График зависимости остаточных поверхностных напряжений по толщине травленного слоя

Отсчет угла φ производится от оси абсцисс против часовой стрелки.

Расчет остаточных напряжений проводят по формуле, предложенной академиком Н.Н.Давиденковым

$$\sigma_{\tau} = - \frac{E \cdot a^2}{3(D-a)^2} \cdot \frac{\Delta D}{\Delta a}, \quad \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2},$$

- где σ_{τ} - величина остаточных поверхностных напряжений, кг/мм²;
 E - модуль упругости обрабатываемого материала, кг/мм²;
 a - толщина кольца, мм;
 D - наружный диаметр кольца, мм;
 Δa - толщина удаленного слоя, мкм;
 ΔD - соответствующее изменение диаметра, мкм.

По данным расчета " σ_{τ} " строят графическую зависимость $\sigma_{\tau} = f(\Delta a)$ (см. рис. 42), которая дает наглядную картину изменения величины и знака остаточных напряжений по толщине стравленного слоя.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

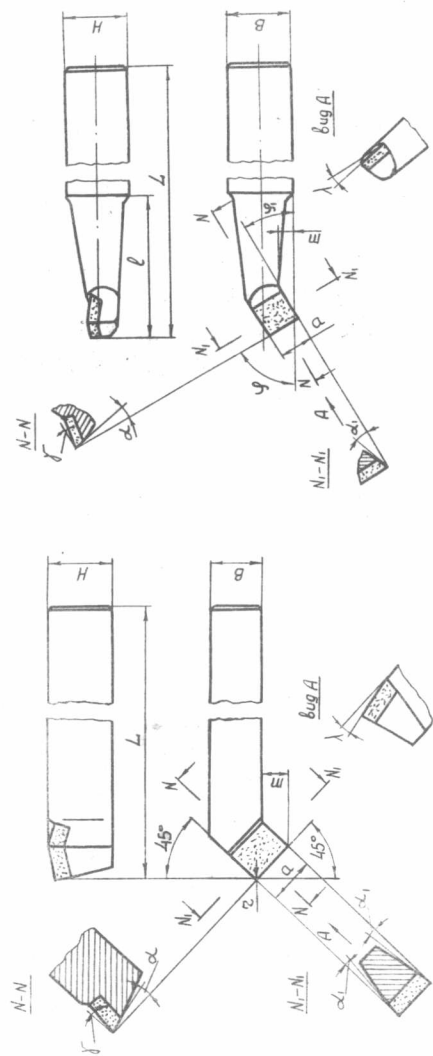


Рис. 1. Конструкция и геометрия проходного отогнутого реза

Рис. 2. Конструкция и геометрия растопного реза

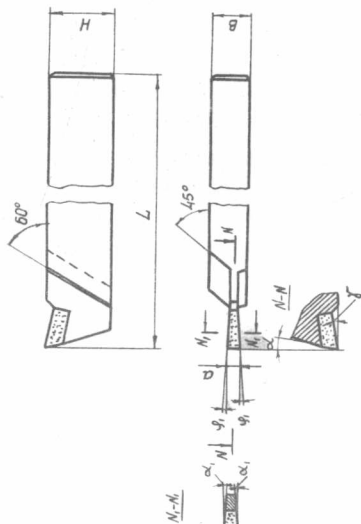


Рис. 3. Конструкция и геометрия отогнутого реза

Таблица 1

СТАНДАРТНЫЕ РАЗМЕРЫ ДЕРЖАВОК ТОКАРНЫХ РЕЗЦОВ

Н, мм	В, мм	Н, мм	В, мм	Н, мм	В, мм	Н, мм	В, мм
4 ^{х)}	4	10	10	20	12	40	25
					16		32
					20		
6 ^{х)}	6	12	12	25	16	50	32
					20		
					25 ^{xx)}		40
8	8	16	10	32	20		
					12		25
					16		

х) только для быстрорежущих резцов

xx) только для расточных резцов

Таблица 2

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ФОРМЫ ПЛАСТИН ТОКАРНЫХ РЕЗЦОВ

(в соответствии с ГОСТом 10043-62 и ГОСТом 6743-61)

Тип резца	Резцы из быстрорежущей стали	Резец с пластинками из твердого сплава
	форма пластин по ГОСТу 2379-67	форма пластин по ГОСТу 2209-69
Проходные прямые (правые и левые)	Режущая часть цельная, а также формы 44, 45	01; 10
Проходные отогнутые (правые и левые)	41	01
Проходные упорные (с углом $\varphi = 90$)	41	07
Подрезные торцевые (правые и левые)	43	06
Расточные (с углом $\varphi = 60$)	Режущая часть цельная	02; 06
Отрезные (правые и левые)	Режущая часть цельная	13А; 13Б

Фрезы червячные чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем по ГОСТу 9324-60 бывают двух типов.

Таблица 3

Тип I. Целые прецизионные (мм)

Модули, <i>m</i> Ряды			<i>D_e</i>	<i>d</i>	<i>D</i> наим	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>Z</i> число зубьев наим.
1	2	3						
I			70	32	50	70	4	16
I,25								
I,5								
	I,75		80	40	60	80		
2								
	2,25							
2,5			100	40	65	100		
	2,75							
3								
		3,25	112	40	70	112		14
		3,5						
		3,75						
4			125	50	80	125	5	
		4,25						
	4,5							
5			140	50	85	140		
		5,5						
6								
		6,5	160	60	90	155		12
		7						
8								
			180	60	95	175		
			200	60	110	195		
10			225	60	120	215		

Таблица 4

Тип П. Цельные общего назначения (мм)

Модули, <i>m</i>			<i>D_e</i>	<i>d</i>	<i>D_i</i> наим.	<i>L</i>		<i>a</i>	<i>Z</i> число зубьев наим.
ряды						Корот- кие	Длин- ные		
1	2	3							
I			63	27	40	40	63	4	12
I,25						50	80		
I,5	1,75					63	90		
2						70	100		
	2,25		80			70	100	5	10
2,5						80	125		
	2,75					90	140		
		3,25	90	32	50	80	112	5	9
		3,5				90	125		
		3,75	100			90	125	5	9
4						100	140		
	4,5		112			100	140	5	9
5						112	160		
6			125	40	60	112	160	5	9
		6,5				125	180		
	7					140	200		
8			140			125	180	5	9
	9					140	225		
10			160			140	200	5	9
	11					160	225		
12			180	50	75	160	225	5	9
		13				180	225		
	14		180			160	225	5	9
						180	225		

Таблица 5

Расчетные размеры фрез по ГОСТу 9324-60 (мм)

Модуль, <i>m</i>		Ф р е з ы														
I	2	3	Тип I				Тип II				Тип III					
			<i>De</i>	<i>K</i>	<i>Dt</i>	ωg	<i>De</i>	<i>K</i>	<i>Dt</i>	ωg	<i>De</i>	<i>K</i>	<i>Dt</i>	ωg	Шаг винтовой канавки НВ	Шаг винтовой канавки НВ
I			70		66,6	0°52'	I3935			59,45	0°58'	III03				
I,25				3	65,97	I°05'	I0935	63		58,83	0°13'	8697				
I,5			80		75,35	I°08'	I1888		3,5	58,19	I°29'	7089				
	I,75		90	3,5	74,72	I°21'	I0020	70		57,57	I°45'	5947				
	2,25		100		83,95	I°22'	I1066			63,95	I°48'	6421				
	2,75				83,32	I°33'	9691		5	63,33	2°02'	5596				
					92,55	I°33'	I0760	80		72,24	I°59'	6554				
				4	91,92	I°42'	9648			71,62	2°12'	5855				
					103,3	I°40'	III70			80,7	2°08'	6815				
	3,25		112		102,67	I°49'	I0165	90	6	80,08	2°20'	6194				
	3,5				102,05	I°58'	9343			79,44	2°32'	5659				
		3,75			101,42	2°07'	8612			78,82	2°44'	5199				
4					113,5	2°01'	I0111			88,05	2°36'	6082				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
		4,25	125	5	112,87	2 ⁰ 09	9410	100	6,5	87,43	2 ⁰ 47	5644					
5	4,5				112,25	2 ⁰ 18	8789			86,79	2 ⁰ 38	5252					
	5,5		140	5,5	124,6	2 ⁰ 32	8859	112	8	97,1	2 ⁰ 57	5916					
6					142,9	2 ⁰ 24	10683			95,84	3 ⁰ 17	5238					
			160	7	141,65	2 ⁰ 38	9688	125	9	107,3	3 ⁰ 12	6019					
		6,5			140,4	2 ⁰ 51	8836			106,04	3 ⁰ 31	5424					
8	7		180		157,45	2 ⁰ 55	9722			104,8	3 ⁰ 50	4918					
			200	6,5	174,95	2 ⁰ 57	10671	140		117	3 ⁰ 55	5383					
10	9		225	9	197,3	2 ⁰ 54	12213	160	10	114,5	4 ⁰ 00	4562					
	11									132	4 ⁰ 21	5458	180	15	155	3 ⁰ 42	7532
										129,5	4 ⁰ 52	4772			152,5	4 ⁰ 08	6625
12										146,4	4 ⁰ 42	5592			170	4 ⁰ 03	7547
										143,9	5 ⁰ 11	4983	200	16,5	167,5	4 ⁰ 27	6759
	14									141,4	5 ⁰ 41	4487			165	4 ⁰ 02	6087
16															185	4 ⁰ 38	6695
	18												225	18,8	180	5 ⁰ 44	5626
20													250	21	200	5 ⁰ 44	6252

ГОСТ 9472-60

Таблица 6

А. Крепление на призматической шпонке

d	b	t_1'	Σ не более
8	2	8,9	0,4
10	3	11,5	0,4
13	3	14,6	0,6
16	4	17,7	0,8
19	5	21,1	0,8
22	6	24,1	0,8
27	6	29,4	1,2
32	8	34,8	1,2
40	10	43,5	1,4
50	12	53,5	1,4
60	14	64,2	1,6
70	16	75	2
80	18	85,5	2
100	24	107	2,5

Таблица 8

б) с номинальным делительным диаметром 100мм (мм)

Модули, <i>m</i>			Число зубьев <i>Z</i>	Диаметры окружностей			Смещение ис- ходного се- чения <i>a</i>	Ширина сту- пын <i>B</i>	Высота дол- бья <i>H</i>	
Ряды				ди- тель- ной <i>d_g</i>	высту- пов <i>D_e</i>	отвер- стия <i>d</i>				выточ- ки <i>d₁</i>
1	2	3								
I			100	100	104,6	44,443	70	10	8	17
	I,125		90	101,25	106,17					
I,25			80	100	105,23					
	I,375		73	100,375	105,98					
I,5			68	102	107,96					
	I,75		58	101,5	108,19					
2			50	100	107,31					
	2,25		45	101,25	109,29					
2,5			40	100	108,46					
	2,75		36	99	108,36					
3			34	102	111,82					
		3,25	31	100,75	110,99					
	3,5		28	98	108,72					
		3,75	27	101,25	112,35					
4			25	100	111,75					
		4,25	24	102	114,12					
	4,5		22	99	111,65					
5			20	100	114,05					
	5,5		19	104,5	119,96					
6			17	102	118,86					
		6,5	16	104	122,27					