

Г. И. ГРАНОВСКИЙ

КИНЕМАТИКА РЕЗАНИЯ

МАШТИЗ
1948

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

Проф., докт. техн. наук
Г. И. ГРАНОВСКИЙ

КИНЕМАТИКА РЕЗАНИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1948

СОДЕРЖАНИЕ

Часть I

Основные вопросы кинематики резания

§ 1. Задачи кинематики резания	5
§ 2. Классификация принципиальных кинематических схем резания.	6
§ 3. Обзор принципиальных кинематических схем резания и соответствующих им траекторий относительного рабочего движения.	14
§ 4. Элементы исследования кинематики резания режущими инструментами	38
§ 5. Определение геометрических параметров γ инструментов, рассматриваемых в состоянии покоя и движения	40
§ 6. Определение задних углов α_d и $\alpha_{зад}$	43
§ 7. Определение угла наклона φ_d главного режущего лезвия	59
§ 8. Определение угла наклона φ_d вспомогательного режущего лезвия	61
§ 9. Определение угла сбега стружки λ_d	62
§ 10. Определение передних углов γ_d	68
§ 11. Приложение формул для выражения углов в движении к токарным резцам, сверлам, метчикам и фрезам	70
§ 12. Последствия установки токарных резцов выше или ниже оси вращения изделия	91

Часть II

Исследование некоторых кинематических схем резания

§ 1. Переход от строгания к протягиванию тел вращения спиральными протяжками	105
Строгание	105
Протягивание плоских поверхностей	106
Протягивание тел вращения плоскими протяжками	108
Переход к протягиванию тел вращения спиральными протяжками	112
§ 2. Переход от фрезерования к протягиванию тел вращения спиральными протяжками	114
Фрезерование цилиндрическими фрезами	114
Фрезерование тел вращения	116
Протягивание тел вращения спиральными протяжками	117
§ 3. Генераторный метод протягивания фасонных тел вращения плоскими и спиральными протяжками	128
§ 4. Толщина стружки при протягивании цилиндрических тел вращения плоскими протяжками	130
§ 5. Сечение стружки при протягивании цилиндрических тел вращения плоскими протяжками	133

§ 6. Толщина стружки при протягивании цилиндрических тел вращения спиральными протяжками	136
§ 7. Сечение стружки при протягивании цилиндрических тел вращения спиральными протяжками	141
§ 8. Сопоставление процесса срезания стружки при точении и протягивании цилиндрических тел вращения токарными резцами, плоскими и спиральными протяжками	145
§ 9. Толщина стружки при протягивании конических тел вращения плоскими протяжками	147
§ 10. Сечение стружки при протягивании конических тел вращения плоскими протяжками	149
§ 11. Толщина стружки при протягивании конических тел вращения спиральными протяжками	155
§ 12. Сечение стружки при протягивании конических тел вращения спиральными протяжками	159
§ 13. Толщина a и сечение F стружки при протягивании тел вращения произвольного фасонного профиля	166
§ 14. Экспериментальные испытания обработки тел вращения методом протягивания	175
§ 15. Использование спиральных протяжек для протягивания цилиндрических и конических тел вращения большой длины	179
§ 16. Обработка тел вращения граневого сечения	181

Часть I

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ КИНЕМАТИКИ РЕЗАНИЯ

§ 1. ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ РЕЗАНИЯ

Обработка металлов резанием основана на движениях, совершаемых режущими элементами инструмента относительно обрабатываемых ими деталей.

Движения, сообщаемые механизмом станка как инструменту, так и детали, могут быть выражены принципиальными кинематическими схемами резания.

В соответствии с принятой принципиальной кинематической схемой резания режущие элементы инструментов в процессе резания перемещаются относительно поверхности резания обрабатываемого изделия по траекториям относительного рабочего движения со скоростями, предопределяемыми кинематическим соотношением: инструмент — изделие.

На этом основании обработанные поверхности имеют своими образующими траектории или части траекторий относительного рабочего движения, вследствие чего внешние очертания контура обработанных поверхностей выражают характер последних на всем их протяжении или на соответствующих отдельных участках.

Отсюда вытекают следующие положения:

а) с изменением принципиальной кинематической схемы резания и кинематического соотношения инструмент — изделие изменяются характер траектории и величина скорости относительного рабочего движения и одновременно с этим также и очертания образуемого им контура обрабатываемого изделия;

б) трение и износ контактных площадок на передних и задних поверхностях инструмента происходят лишь в направлениях траекторий относительного рабочего движения, по которым в процессе резания осуществляется действительное взаимное перемещение и взаимодействие металла инструмента, изделия и стружки.

Этими положениями определяются две задачи кинематики резания металлов.

Первая задача состоит в анализе и классификации возможных принципиальных кинематических схем резания и очертаний внешнего контура обработанных изделий, образованных траек-

ториями относительного рабочего движения совокупности точек режущего лезвия, предопределяемыми принципиальными кинематическими схемами резания и кинематическим соотношением инструмент — изделие.

Величины геометрических параметров режущих элементов, измеренные на инструментах в статическом их положении, в общем случае не сохраняются в процессе резания. В зависимости от характера траекторий относительного рабочего движения, расположения режущих элементов относительно обрабатываемых деталей и действительного направления сбег стружки фактические геометрические параметры в движении в общем случае отличны по абсолютной величине и направлению от геометрических параметров в статическом состоянии. Определение величины и направления фактических геометрических параметров в процессе движения является предпосылкой для теоретического обоснования совершенства конструкции инструмента и его эксплуатационной эффективности.

Поэтому вторая задача кинематики резания металлов состоит в формулировании определений геометрических параметров в состоянии движения, предопределяющих процесс резания, износ и стойкость металлорежущих инструментов.

Уместно отметить, что до последнего времени принципиальные кинематические схемы резания рассматриваются как заранее заданные и лишь как вытекающие из кинематики уже существующих станков. Отсутствие какой-либо системы исследования как используемых в практике, так и возможных принципиальных кинематических схем резания является большим препятствием для развития творческой мысли и научно обоснованного комплексного анализа новых методов обработки, новых оригинальных конструкций инструментов и станков.

Разрешая поставленные выше задачи, автор имеет в виду, во-первых, дать основы научного метода исследования кинематических схем резания и критерии для выбора наиболее рентабельных вариантов, вытекающих из этого исследования, а, во-вторых, обоснованные суждения и данные для конструирования режущих инструментов на базе кинематики резания.

§ 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ РЕЗАНИЯ

Принципиальные кинематические схемы резания выражают абсолютные движения, сообщаемые в процессе резания инструменту и обрабатываемому изделию механизмом станка. Движения холостых циклов, в течение которых инструмент и заготовка не имеют контакта, принципиальными кинематическими схемами резания не выражаются. В общем случае принципиальные кинематические схемы резания не тождественны принципиальным кинематическим схемам механизма станка, и последние могут быть сложнее первых. В этом заключается разница между кинематикой резания и кинематикой станка.

Стремление к обработке изделий любой формы простейшим и кратчайшим путем привело к тому, что принципиальные кинематические схемы резания получились основанными на сочетании двух элементарных движений: а) прямолинейного и б) вращательного.

Сложность, теоретический интерес и практическая ценность принципиальных кинематических схем резания зависят от количества и характера сочетаемых элементарных движений. На этой основе можно классифицировать все возможные, в том числе и не нашедшие своего практического приложения принципиальные кинематические схемы резания по следующим группам:

первая группа — одно прямолинейное движение;

вторая группа — два прямолинейных движения;

третья группа — одно вращательное движение;

четвертая группа — одно вращательное и одно прямолинейное движение;

пятая группа — два вращательных движения;

шестая группа — два прямолинейных и одно вращательное движение;

седьмая группа — два вращательных и одно прямолинейное движение;

восьмая группа — три вращательных движения.

Возможно сочетание четырех и большего количества элементарных движений; однако их практическое применение весьма ограничено из-за сложности процесса. Поэтому такие сочетания в настоящей работе не рассматриваются.

Всем характеристическим принципиальным схемам резания присвоен номер. Первая цифра номера указывает на принадлежность к группе, а следующие две цифры — на очередной порядковый номер, занимаемый схемой в группе.

Простейшая структура принципиальной кинематической схемы основана на одном движении, сообщаемом механизмом станка либо инструменту при неподвижном положении изделия, либо изделию при неподвижном положении инструмента. Это единственное движение, выражающее лишь одну скорость резания, может быть названо простым рабочим движением.

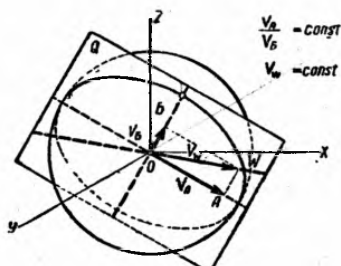
Одно движение дает лишь единственное сочетание и поэтому в табл. 1 оно выражено в первой группе одним прямолинейным, а в третьей группе — одним вращательным движением.

Более сложная структура принципиальной кинематической схемы основана на сочетании двух одновременно действующих элементарных движений (вторая, четвертая и пятая группы). Одно из двух движений в этом сочетании всегда является скоростью резания, а другое — подачей, кроме особых случаев, когда последнее движение неравномерно и осуществляется копиром. В этом случае оно является вспомогательным движением, а не подачей, и предопределяет специфический характер траекторий относительного рабочего движения точек режущего лезвия. Каждое из сочетаемых движений, рассматриваемое порознь, является простым, а их результирующая — сложным рабочим движением.

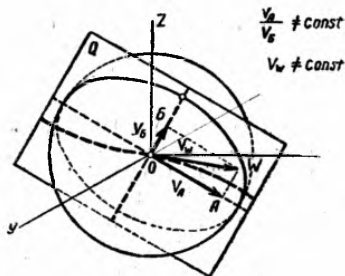
Два элементарных движения могут иметь совершенно произвольные направление и скорость. Оба они в состоянии образовывать бесчисленное множество сочетаний. Каждое из них, будучи использовано в процессе резания металлов, может дать конечный результат, отличный от такового при других сочетаниях.

Ко второй группе отнесены принципиальные кинематические схемы, структура которых основана на сочетании двух прямолинейных простых рабочих движений. Из них одно движение A всегда равномерно, а другое B может быть равномерным или неравномерным.

Для выяснения числа возможных сочетаний на фиг. 1 равномерное прямолинейное движение представлено вектором A , про-



Фиг. 1.



Фиг. 2.

ходящим через точку O начала пространственной координатной системы XYZ . Тогда другое, равномерное или неравномерное, движение B может быть представлено вектором, направленным по радиусу r сферы, центр которой совпадает с точкой O начала координат.

Результирующее двух элементарных равномерных прямолинейных рабочих движений со скоростями v_A и v_B (фиг. 1) есть сложное равномерное прямолинейное рабочее движение, представленное вектором W . Вектор W проходит через точку O начала координат и лежит в плоскости Q действия слагаемых векторов A и B .

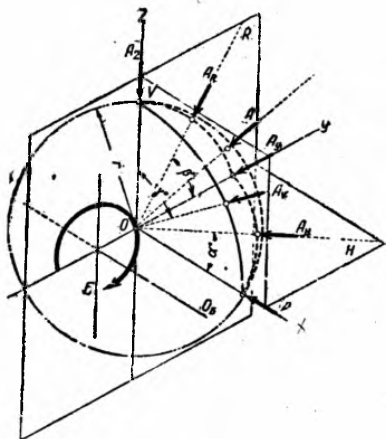
Результирующее одного равномерного прямолинейного простого рабочего движения, представленного на фиг. 2 вектором A , и одного неравномерного прямолинейного движения переменного направления, представленного вектором B , есть неравномерное криволинейное сложное рабочее движение. Оно представлено вектором W , лежащим в плоскости Q , величина и направление которого изменяются в зависимости от соотношения мгновенных скоростей v_A и v_B слагаемых простых рабочих движений.

Результирующие сложные рабочие движения W второй группы классификации как равномерное прямолинейное, так и неравномерное криволинейное совершаются в плоскости Q , про-

ходящей через векторы A и B простых движений. Предопределяемые ими сложные траектории относительного рабочего движения также являются прямолинейными или криволинейными геометрическими линиями, все точки которых лежат в плоскости Q .

При неизменном направлении вектора A вектор B , направленный по радиусу r сферы, и связанная с ним плоскость Q могут занять относительно координатных осей XYZ бесконечно большое число возможных положений. Типичными из них являются лишь те характеристические частные сочетания, на основе которых построены структуры пяти принципиальных кинематических схем резания, представленные во второй группе (табл. 1), и анализ которых позволяет с достаточной полнотой подвергнуть теоретическому исследованию целесообразность практического приложения всех возможных сочетаний второй группы.

К четвертой группе отнесены принципиальные кинематические схемы резания, структура которых построена на сочетании двух простых движений. Одна из них равномерно и прямолинейно и представлено вектором A , а другое—равномерное вращательное (вектор B). Эти два равномерных движения, так же как и во второй группе, образуют бесконечно большое число возможных сочетаний.



Фиг. 3.

Для определения числа характеристических частных сочетаний оба рассматриваемых простых движения на фиг. 3 представлены в пространственной координатной системе XYZ .

Пусть вращательное движение B осуществляется в плоскости R , проходящей через точку O начала координат. Вращение происходит вокруг неподвижной оси O_B , расположенной параллельно координатной оси X . Другое равномерное прямолинейное движение может быть представлено вектором A , направленным по радиусу r сферы с центром в точке O начала координат. Восьмая часть поверхности этой сферы, заключенная между плоскостями H , V и R , изображена на фиг. 3.

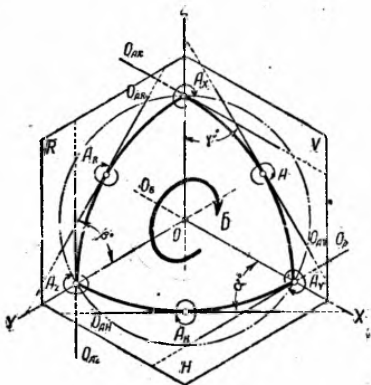
Рассматривая частные сочетания, когда при неизменном положении оси вращательного движения B вектор A последовательно располагается сначала по осям X , Y и Z , потом в плоскостях H , V и R и, наконец, занимает положение радиуса r произвольной точки на поверхности сферы, получаем семь характеристических сочетаний, представленных в четвертой группе,

анализ которых позволяет теоретически исследовать целесообразность практического приложения всех возможных сочетаний четвертой группы.

Результирующее одного равномерного прямолинейного и одного равномерного вращательного движений, отнесенных к четвертой группе, есть равномерное криволинейное сложное рабочее движение, совершаемое в плоскости, когда вектор A простого прямолинейного движения направлен вдоль осей Y и Z или же лежит в плоскости R действия вращательного движения B . Когда же вектор A направлен вдоль оси X или же лежит в плоскости H и V , движение совершается в пространстве. Траектория

относительного рабочего движения, предопределяемая результирующим сложным рабочим движением, в первом случае будет криволинейной геометрической линией, все точки которой лежат в плоскости R , перпендикулярной к оси O_B вращательного движения B , а во втором случае будет пространственной криволинейной геометрической линией, все точки которой лежат на поверхности либо цилиндра, либо однополлого гиперболоида.

К пятой группе отнесены принципиальные кинематические схемы резания, структура которых построена на сочетании двух равномерных враща-



Фиг. 4.

тельных движений A и B , образующих, так же как во второй и четвертой группах, бесконечно большое число сочетаний. Для определения числа характеристических сочетаний на фиг. 4 оба сочетаемых вращательных движения отнесены к пространственной системе координат XYZ .

Пусть вращательное движение B имеет равномерную угловую скорость ω_B и неподвижную ось O_B , совпадающую с координатной осью X . Движение A также имеет равномерную угловую скорость ω_A и ось O_A , занимающую в пространстве совершенно произвольное положение.

Вращая ось O_A сначала вокруг координатной оси Z , получаем в плоскости H два характеристических частных положения. Из них одно O_{AY} параллельно оси Y и перпендикулярно к осям X и Z при $\alpha^\circ = 90^\circ$, другое O_{AH} располагается наклонно к этим осям так, что $0^\circ < \alpha^\circ < 90^\circ$.

Вращением оси O_A вокруг координатной оси X получаем в плоскости R еще два характеристических частных положения. Из них одно O_{AZ} параллельно оси Z и перпендикулярно к осям X

и Y при $\beta^\circ = 90^\circ$, а другое O_{AR} располагается наклонно к этим осям так, что $0 < \beta^\circ < 90^\circ$.

Вращением оси O_A вокруг координатной оси Y получаем в плоскости V еще два характеристических частных положения. Из них одно O_{AX} параллельно оси X и перпендикулярно к осям Y и Z при $\gamma^\circ = 90^\circ$, а другое O_{AV} располагается наклонно к этим осям так, что $0 < \beta^\circ < 90^\circ$.

Возможно еще одно характеристическое частное сочетание, когда ось O_A в произвольной точке касается поверхности, заключенной между плоскостями H , V и R восьмой части сферы радиуса r . Однако в табл. 1 оно опущено как самостоятельное характеристическое частное сочетание, ибо может быть получено в результате суммирования ранее отмеченных характеристических частных сочетаний. Зато представляет интерес другое характеристическое частное положение, полученное смещением оси O_B вращательного движения B , как показано на схеме (табл. 1) под номером 505.

Таким образом, общее число характеристических частных сочетаний выражается семью принципиальными кинематическими схемами резания, представленными в пятой группе табл. 1. Анализ этих семи принципиальных кинематических схем позволяет произвести теоретические исследования целесообразности практического приложения любых возможных сочетаний двух равномерных вращательных движений.

Результирующее двух равномерных вращательных движений (отнесенных к пятой группе) есть равномерное криволинейное сложное рабочее движение, совершаемое, во-первых, в плоскости R , когда оси O_A и O_B параллельны, и, во-вторых в пространстве, когда эти оси пересекаются или перекрещиваются под любым углом, отличным от нуля. Траектории относительного рабочего движения, предопределяемые результирующим сложным движением, в первом случае также будут криволинейными линиями, все точки которых лежат в плоскости R ; во втором случае они будут пространственными криволинейными линиями, все точки которых лежат на пространственных поверхностях сложного порядка.

Наиболее сложная структура принципиальных кинематических схем, отнесенных к шестой, седьмой и восьмой группам рассматриваемой классификации, основана на сочетании трех одновременно действующих элементарных движений. Из трех сочетаемых движений одно всегда определяет номинальную скорость резания, другое — подачу, а третье является вспомогательным движением. Направление и скорость последнего предопределяют специфику получаемых траекторий относительного рабочего движения и соответствующих методов обработки.

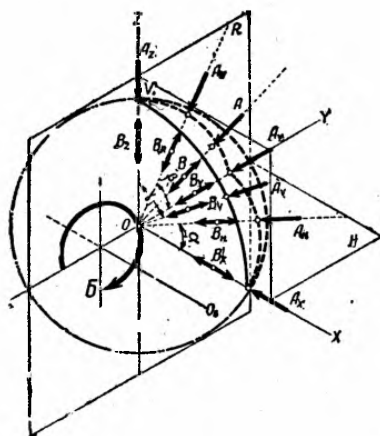
Каждое из трех сочетаемых движений, рассматриваемое отдельно, является простым, а их результирующая — сложным рабочим движением. Скорость каждого движения может быть совершенно произвольной и поэтому возможно бесчисленное множество частных кинематических соотношений. Каждому соотно-

шению в процессе резания может соответствовать свое специфическое внешнее очертание обработанного изделия и величина геометрических параметров в движении. При всех сочетаниях мгновенная скорость сложного рабочего движения является действительной, равномерной или неравномерной скоростью резания.

К шестой группе отнесены принципиальные кинематические схемы резания, структура которых построена на сочетании:

- а) одного равномерного прямолинейного движения A ;
- б) одного равномерного вращательного движения B ;
- в) одного равномерного или неравномерного возвратно-поступательного движения B .

Из этих трех элементарных движений сочетания двух (A и B) образует рассмотренные в четвертой группе семь характеристических сочетаний.



Фиг. 5.

Дополнение к этим двум третьего элементарного равномерного или неравномерного возвратно-поступательного прямолинейного движения B , занимающего в последовательном порядке все те же положения (Фиг. 5), что и движение A , повторяет сочетания четвертой группы еще 7 раз. Таким образом, общее число характеристических сочетаний выражается приведенными в шестой группе (табл. 1) 49 принципиальными кинематическими схемами резания.

Результатирующее рассматриваемых в шестой группе трех элементарных движений есть равномерное или неравномерное прерывистое сложное

рабочее движение, совершаемое в плоскости R , когда движения A и B направлены вдоль осей Y и Z или же наклонно к этим осям в плоскости R , и совершаемое в пространстве, когда движения A и B направлены вдоль оси X или же наклонно к ней в плоскостях H и V или же произвольно в пространстве.

Траектории относительного рабочего движения, предопределяемые результирующим сложным движением, в первом случае будут криволинейными линиями, все точки которых лежат в плоскости R , а во втором случае будут пространственными криволинейными линиями, все точки которых лежат на поверхности конуса, ось которого совпадает с осью O_B вращательного движения B .

К седьмой группе отнесены принципиальные кинематические схемы резания, структура которых построена на сочетании:

- а) двух равномерных вращательных движений A и B ;
- б) одного равномерного прямолинейного движения B .

Из этих трех элементарных движений сочетание двух равномерных вращательных движений A и B образует рассмотренные в пятой группе семь характеристических сочетаний. Дополнение к этим двум движениям третьего равномерного прямолинейного движения B , занимающего в последовательном порядке все положения движения A в четвертой группе, повторяет семь сочетаний пятой группы 7 раз. Таким образом, общее число характеристических сочетаний выражается 49 принципиальными кинематическими схемами резания, представленными в седьмой группе (табл. 1).

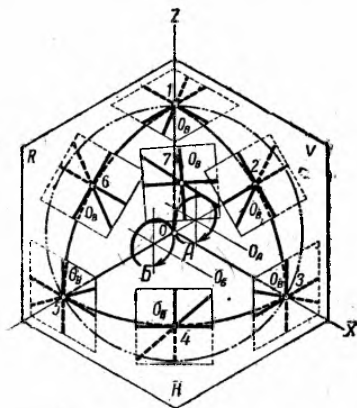
Результирующее рассматриваемых в седьмой группе трех элементарных движений есть равномерное сложное рабочее движение, совершаемое: 1) в плоскости R , когда оси O_A и O_B вращательных движений параллельны, а прямолинейное движение B направлено вдоль координатных осей Y и Z или же наклонно к этим осям в плоскости R ; 2) в пространстве, когда оси O_A и O_B пересекаются или перекрещиваются под любым углом, отличным от нуля, или же когда прямолинейное движение B направлено вдоль оси X или в плоскости H и V ; 3) произвольно в пространстве. Траектории относительного рабочего движения, предопределяемые результирующим сложным движением, в первом случае будут криволинейными линиями, точки которых лежат в плоскости R ; во втором случае они будут пространственными криволинейными линиями, точки которых лежат на пространственных поверхностях высшего порядка.

К восьмой группе отнесены принципиальные кинематические схемы, структура которых построена на сочетании трех вращательных движений A , B и B . Из этих трех элементарных движений сочетание двух (A и B) образует рассмотренные в пятой группе 7 характеристических сочетаний. Дополнение к этим двум еще третьего вращательного движения B позволяет любое из первых двух вращательных движений повернуть вокруг третьей оси O_B , занимающей в пространстве любое положение, что существенно усложняет структуру образуемых тремя вращательными движениями кинематических схем резания.

Для определения возможных положений оси O_B третьего вращательного движения B и числа характеристических сочетаний рассмотрим представленную на фиг. 6 схему.

Пусть оси O_A и O_B параллельны оси X и вращательные движения A и B взаимно касаются в точке O начала пространственной системы координат XYZ . Тогда ось O_B вращательного движения B можно рассматривать как касательную в произвольной точке к сферической поверхности радиуса r , описанной около точки O начала координат и заключенной между плоскостями R , V и H . Но так как в каждой точке сферической поверхности можно провести бесконечное множество касательных, то число возможных положений оси O_B в пространстве тоже бесконечно большое.

Из этого бесконечно большого числа возможных положений оси O_B в качестве характеристических могут быть приняты касательные в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7. В каждой из первых шести точек необходимо взять три положения касательных: одно — касательное к дуге сферы и лежащее в одной из плоскостей R , V и H ; другое — перпендикулярное к первой касательной и третье положение касательной произвольное, как показано на схеме фиг. 6. В точке 7 одна касательная лежит в плоскости, проходящей через координатную ось Z . Другая касательная перпендикулярна к первой. Третья касательная занимает произвольное положение, как это видно на схеме фиг. 6.



Фиг. 6.

все три оси O_A , O_B и O_V сочетаемых вращательных движений параллельны, и совершаемое в пространстве, когда хотя бы одна из этих осей пересекается или перекрещивается с двумя другими под любым углом, отличным от нуля.

§ 3. ОБЗОР ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ РЕЗАНИЯ И СООТВЕТСТВУЮЩИХ ИМ ТРАЕКТОРИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАБОЧЕГО ДВИЖЕНИЯ

Из характеристических принципиальных кинематических схем резания всех восьми рассмотренных групп принятой классификации практическое приложение в области обработки металлов резанием нашло сравнительно небольшое их число, отмеченное в табл. 1 более толстой окантовкой. Большинство же характеристических принципиальных схем резания до сего времени не имеет практического применения. Однако из этого не следует, что они лишены практического интереса и не могут быть эффективно использованы для обработки металлов резанием. Наоборот, многие из неиспользованных схем таят в себе большие возможности. Свидетельством этого может служить изло-

женное во второй части исследование прикладной стороны некоторых принципиальных кинематических схем резания применительно к обработке тел вращения методами фрезерования и протягивания и обработке тел граненого сечения на станках токарного типа.

В практике используется лишь ограниченное число принципиальных кинематических схем, а большинство их остается без использования. Это объясняется не только отсутствием глубокого и всестороннего исследования возможностей каждой схемы, но, главным образом, полным отсутствием какой-либо системы и метода этих исследований. Все до сих пор достигнутое в этом направлении сделано без всякой системы и в порядке более или менее удачного решения частных назревших потребностей практики. Эти частные решения обычно выражаются в форме изобретения новых методов и приемов обработки с последующим их усовершенствованием. Во многих случаях можно было бы избежать этих недостатков, если бы решения поставленных практикой проблем осуществлялись в рамках определенной системы и методики теоретического исследования кинематики резания металлов.

Теоретический интерес и прикладная ценность каждой из многочисленных принципиальных кинематических схем резания всех восьми групп рассмотренной классификации являются предметом многих исследований и, естественно, весь этот труд не может быть осуществлен в рамках одной работы. Данный труд не ставит своей целью дать законченную систему и методику теоретического исследования кинематических схем резания, и автору пришлось ограничиться лишь классификацией и некоторыми указаниями в направлении методики их исследования. В соответствии с этим ниже излагается рассмотрение прикладной стороны тех принципиальных кинематических схем резания, практическое использование которых известно. Иллюстрация всех этих схем дана в табл. 2.

Схема 101 первой группы выражает единственное прямолинейное движение *A*, сообщаемое инструменту при неподвижном положении изделия или сообщаемое изделию при неподвижном положении инструмента в момент рабочего хода. Область практического применения схемы 101 довольно обширная. На ней основаны строгание, долбление, протягивание и частично зубострогание. Во всех этих случаях траекториями относительного рабочего движения являются прямые линии.

Схемы 203 и 204 второй группы выражают два одновременно действующих прямолинейных движения.

Схема 203 предусматривает сочетание равномерных прямолинейных движений *A* и *B*. Каждое из них можно сообщить как инструменту, так и изделию. Независимо от этого результирующее обоих равномерных прямолинейных движений также представляет собой равномерное прямолинейное движение, наклон которого в пространстве зависит от соотношения ско-

Таблица 2

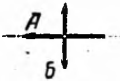
№	Кинематическая схема	Инстру- мент	Изде- лие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
101		A	A		Прямая линия	1. Стругание резцами 2. Долбление резцами 3. Протягивание протяжками 4. Зубостроение зубострогаль- ными инструментами
203		A B	B A		Прямая линия	Разрезка ленточными пилами
201		A B B	A		Кривая линия	Стругание резцами по копиру
301		A	A		Окружность	1. Хонинг-процесс 2. Протягивание круговых сег- ментов

Таблица 2 (продолжение)

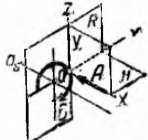
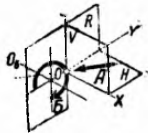
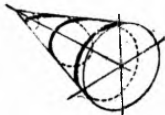
№	Кинематическая схема	Инстру- мент	Изде- лие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
401		A	Б		Винтовая линия	1. Точение резцами 2. Резьбонарезание резцами и гребенками 3. Резьбонарезание плашками на автоматах 4. Обточка фасонными резцами 5. Расточка 6. Протягивание винтовых пазов
		Б	А			1. Нарезка гаек на автоматах 2. Резьбонарезание плашками на болторезках
		А Б				1. Резьбонарезание метчиками на сверлильных и плашками на токарных станках 2. Сверление, зенкерование, развертывание, расточка 3. Протягивание винтовых пазов
402		А	Б		Коническая винтовая линия	1. Обточка конусов резцами 2. Обточка фасонными резцами

Таблица 2 (продолжение)

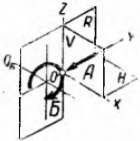
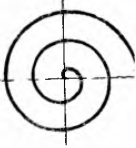
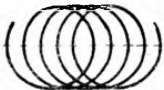
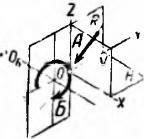
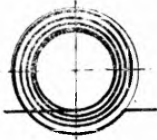
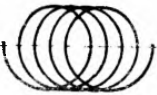
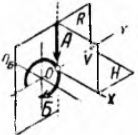
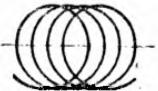
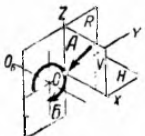
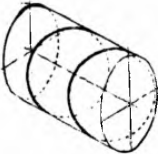
№	Кинематическая схема	Инструмент	Изделие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
403		A	B		Архимедова спираль	1. Огрезка отрезными резцами 2. Обточка фасонными резцами 3. Подрезка торцов подрезными резцами
		B	A		Удлиненная циклоида (трахоида)	1. Разрезка дисковыми пилами 2. Фрезерование торцевыми фрезерными головками
404		A	B		Плоскостная спираль (укороченная циклическая кривая — периклоида)	1. Точение тангенциальными фасонными резцами 2. Протягивание тел вращения плоскими протяжками
		B	A		Удлиненная циклоида (трахоида)	1. Фрезерование канавочными и прорезными фрезами

Таблица 2 (продолжение)

№	Кинематическая схема	Инструмент	Изделие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
405		Б	А		Удлиненная циклоида (трахоида)	1. Фрезерование цилиндрическими фрезами 2. Плоское шлифование периферией камня
406		Б	А		Перекошенная винтовая линия на поверхности эллиптического цилиндра	Фрезерование канавки эллиптического сечения

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

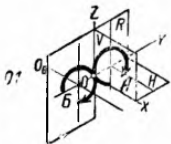
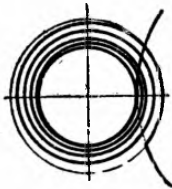
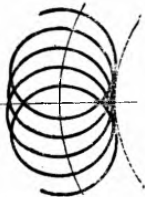
№	Кинематическая схема	Инстру- мент	Изде- лие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
501		A	Б		Плоскостная спираль (укороченная циклическая кривая — периклоида)	Наружное протягивание тел вращения спиральными протяжками (при условии, что $\omega_B > \omega_A$)
					Удлиненная эпициклоида	Фрезерование тел вращения (при условии, что $\omega_A > \omega_B$)

Таблица 2 (продолжение)

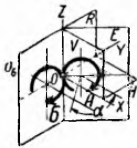
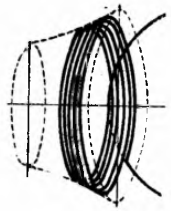
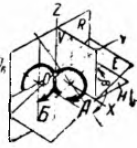
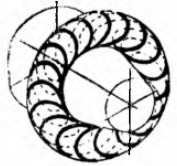
№	Кинематическая схема	Инстру- мент	Изде- лие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
502		A	Б		Пространственная спираль (циклическая кривая)	Протягивание поднутренных поверхностей тел вращения спиральными протяжками (при условии, что $\omega_B > \omega_A$)
504		A	Б		Перекошенная винтовая линия на поверхности кольца круглого сечения	Зубофрезерование эвольвентных направленных зубьев на конических шестернях червячными коническими фрезами Клингельберга

Таблица 2 (продолжение)

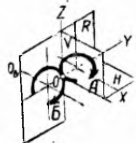
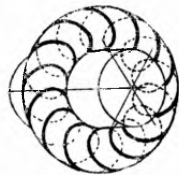
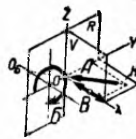
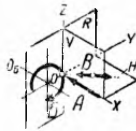
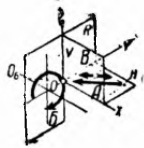
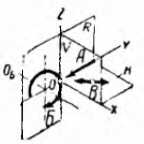
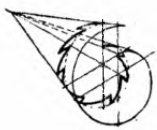
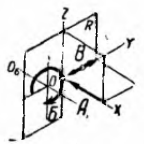
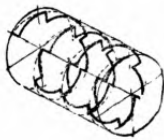
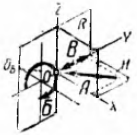
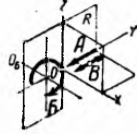
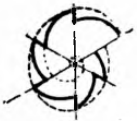
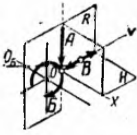
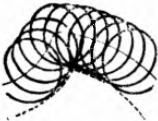
№	Кинематическая схема	Инстру- мент	Изде- лие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
506		A	Б		Винтовая линия на поверхности цилиндра круглого сечения	Зубофрезерование червячного ко- леса червячной фрезой
602		A B	Б		Коническая винтовая линия	Боковое затылование конических и улитчных фрез (червячных)
608		A B	Б		Коническая винтовая линия	Боковое затылование цилиндри- ческих червячных фрез

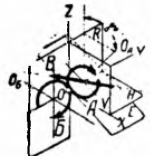
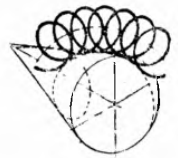
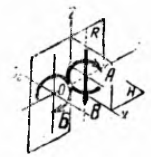
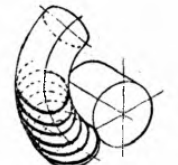
Таблица 2 (продолжение)

№	Кинематическая схема	Инстру- мент	Изде- лие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
609		A B	Б		Коническая винтовая линия	Боковое затылование конических и улиточных фрез
610		A B	Б		Коническая винтовая линия	Затылование боковых сторон зубьев спиральных протяжек для наружного протягивания тел вра- щения
615		A B	Б		Коническая винтовая линия	1. Затылование червячных фрез 2. Обточка резцами тел некруг- лого сечения (кулачков, эллипсов, граненых призм)

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

№	Кинематическая схема	Инструмент	Изделие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
616		A B	B		Коническая винтовая линия	Затылование конических и угловых фрез
617		A B	B		Плоскостная спираль	Затылование вершин зубьев у спиральных протяжек для наружного протягивания тел вращения
619		B	A B		Удлиненная циклическая кривая, огибающая фасонный профиль обрабатываемой детали	Копировально-фрезерная обработка фасонных поверхностей на призматических деталях

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

№	Кинематическая схема	Инстру- мент	Изде- лие	Траектория относительного движения		Область практического применения
				Схема	Название	
716		A B	Б		Винтовая эпицикли- ческая кривая	Фрезерование винтовых канавок дисковыми фрезами на конических телах
734		A B	Б		Винтовая линия на поверхности кругово- го цилиндра с эволь- вентными образу- ющими	Осевое врезание червячными фрезами при фрезеровании червяч- ных зубчатых колес

ростей $\frac{v_A}{v_B}$. Нам известен лишь один случай использования схемы 203 применительно к разрезке металлов ленточными пилами. В этом случае, если предположить, что движение A сообщается инструменту, а движение B — изделию, то скорость v_A является скоростью резания, а скорость v_B — подачей и всегда $v_A > v_B$. Траекторией относительного рабочего движения по схеме 203 является прямая линия, наклоненная к вектору A под углом

$$\alpha_d = \arctg \frac{v_B}{v_A}, \quad (1)$$

и образованная суммированием двух одновременно действующих равномерных прямолинейных элементарных движений A и B .

Схема 204 предусматривает одно равномерное прямолинейное движение A и одно неравномерное прямолинейное движение B переменного направления. Оба движения A и B могут быть сообщаемы либо только инструменту при неподвижном положении изделия в момент рабочего хода, либо наоборот. Наравне с этим допустимо положение, когда равномерное движение A сообщается изделию, а переменное движение B — инструменту, или наоборот. Независимо от этого во всех случаях результирующее обоих движений A и B будет неравномерное криволинейное движение, совершаемое в плоскости действия слагаемых элементарных движений A и B , характер и кривизна которого целиком зависят от соотношения скоростей $\frac{v_A}{v_B}$.

Нам известен лишь один случай практического приложения схемы 204 в области строгания резцами пространственных поверхностей по копиру. В этом случае равномерное прямолинейное движение A сообщается изделию, а неравномерное движение переменного направления B — инструменту. Скорость v_A является скоростью резания, а v_B — скоростью вспомогательного движения B , передающего от копира на обработанную поверхность изделия потребные специфические форму и кривизну. При этом, как правило, $v_A > v_B$. Траектория относительного рабочего движения по схеме 204 является плоскостной кривой линией, касательные к которой в разных точках образуют с вектором A переменный по величине и знаку угол α_d в зависимости от абсолютной величины и знака скорости v_B .

Схема 301 третьей группы, подобно схеме 101 первой группы, выражает одно единственное равномерное вращательное движение A , сообщаемое инструменту при неподвижном положении изделия или изделию при неподвижном положении инструмента в момент рабочего хода. Схема 301 не имеет широкого практического применения. Известны лишь случаи использования схемы 301 в процессе хонингования отверстий хонинг-головками, устроенными по принципу использования центробежной силы и протягивания сегментов на вращающемся столе специального

протяжного станка. Траекторией относительного рабочего движения является окружность.

Схемы 401, 402, 403, 404, 405 и 406 четвертой группы выражают два одновременно действующих равномерных движения: прямолинейное движение A и вращательное движение B .

Схема 401 еще на заре развития техники нашла свое практическое приложение. В настоящее время на ней основаны наиболее широко распространенные методы обработки металлов: точение проходными фасонными и расточными резцами, нарезание резьбы резцами, метчиками, плашками и гребенками; сверление, зенкерование и развертывание; протягивание винтовых пазов (табл. 2).

Такое многообразие методов и видов обработки, основанных на одной единственной схеме 401, достигается за счет:

а) взаимной комбинации движений A и B , сообщаемых инструменту и изделию;

б) соотношения скоростей этих движений $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B}$.

Первая комбинация: прямолинейное движение A сообщается инструменту, а вращательное движение B — изделию.

При обточке фасонных поверхностей на торцевых сторонах изделий фасонными резцами скорость v_A прямолинейного движения A меньше скорости v_B вращательного движения B и их

соотношение $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B}$ порядка 0,0005. В силу этого прямолинейное движение A является подачей, а вращательное движение B определяет номинальную скорость резания.

При обточке цилиндрических поверхностей токарными проходными и расточными резцами значения движений A и B в процессе резания те же, что для фасонных резцов, только соотношение скоростей этих движений несколько иного порядка:

$$\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} = 0,0005 \text{ до } 0,005.$$

При нарезании резьбы резцами, метчиками и плашками прямолинейное движение A уже не является подачей, а представляет собой вспомогательное движение, передающее на изделие соответствующий шаг нарезаемой резьбы. Скорость вращательного движения B попрежнему определяет номинальную скорость резания. Соотношение скоростей этих движений еще большего порядка, т. е.

$$\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} = 0,005 \text{ до } 0,05.$$

При нарезании резьбы резцами подача осуществляется как третье движение, сообщаемое инструменту в промежутках между рабочими циклами; оно является составным элементом кинематики механизма станка, но не учитывается кинематическими схемами резания.

При нарезании резьбы метчиками и плашками „движение подачи“ достигается чисто конструктивными мероприятиями, выражающимися наличием на инструментах специальных элементов, известных под названием заборной части.

При протягивании винтовых пазов скорость v_A прямолинейного движения A обычно больше скорости v_B вращательного движения B . В этом случае скорость v_A определяет номинальную скорость резания, а вращательное движение B является вспомогательным, предопределяющим угол наклона протягиваемого паза. Наиболее вероятное соотношение $\varepsilon \gg 1$ зависит от винтового параметра протягиваемого паза. Подобно метчикам и плашкам при протягивании винтовых пазов „движение подачи“ также достигается чисто конструктивными мероприятиями, выражающимися наличием на протяжках так называемого „подъема“ зубьев на рабочих частях.

„Движение подачи“, достигаемое наличием на инструментах соответствующих конструктивных элементов, как реальное движение в природе не существует и его следует рассматривать как понятие описательного порядка.

Вторая комбинация: прямолинейное движение A сообщается изделию, а вращательное движение B — инструменту.

Нарезание резьбы метчиками и плашками при первой комбинации сочетаемых движений A и B осуществляется на токарных станках и токарных автоматах. При второй комбинации сочетаемых движений A и B нарезание резьбы теми же инструментами осуществляется на специальных гайконарезных автоматах, и болторезных станках.

Прямолинейное движение A , сообщаемое теперь изделию, является вспомогательным движением, передающим на изделие надлежащий шаг нарезаемой резьбы, а вращательное движение B , сообщаемое инструменту, предопределяет номинальную скорость резания. Соотношение скоростей этих движений как связанное с шагом нарезаемой резьбы в данном случае от комбинации сочетаемых движений не зависит и остается таким же, как в первой комбинации.

Третья комбинация: оба движения — прямолинейное A и вращательное B — сообщаются инструменту при неподвижном положении изделия.

При третьей комбинации сочетаемых движений A и B нарезание резьбы метчиками осуществляется на станках сверлильного типа. Как и в первых двух, в третьей комбинации прямолинейное движение A является вспомогательным движением, передающим на изделие надлежащий шаг нарезаемой резьбы, а вращательное движение B предопределяет скорость резания. Соотношение скоростей этих движений по ранее уже указанным причинам остается таким же, как в первых двух комбинациях. Следовательно, в отношении резьбонарезания метчиками все три рассматриваемые комбинации приводят к одинаковым результатам. В данном примере выбор той или иной комбинации

определяется не соображениями, вытекающими из кинематики резания, а кинематической схемой и конструкцией станка.

С увеличением соотношения скоростей ε сочетаемых в третьей комбинации движений A и B до значений порядка единицы и больше процесс нарезания резьбы метчиками переходит в процесс протягивания винтовых пазов протяжками. Одновременно с этим изменяется и значение сочетаемых движений. Прямолинейное движение A перестает быть вспомогательным и при $\varepsilon \geq 1$ предопределяет скорость резания. Вращательное движение B , наоборот, выполняет функцию вспомогательного движения и предопределяет винтовой параметр протягиваемого паза. В обоих рассматриваемых случаях движение подачи достигается наличием на инструментах специальных конструктивных элементов.

Таким образом, во всех трех комбинациях метод нарезания резьбы метчиками отличается от метода протягивания винтовых

пазов лишь соотношением $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B}$. В зависимости от этого соотношения сочетаемые движения A и B по своей значимости в процессе резания меняются местами.

Во многих случаях обработки металлов сверлением, зенкерованием, развертыванием и расточкой либо совершенно невозможно сообщить какие-либо движения изделию, либо это сопряжено с большими трудностями. Поэтому на использовании первых двух комбинаций движений A и B основано относительно ограниченное число случаев обработки отверстий (обработка глубоких отверстий, расточка на карусельных станках). Основной станочный парк для тех же целей основан на использовании третьей комбинации. При этом скорость v_A прямолинейного движения A , являющегося подачей, всегда меньше скорости v_B вращательного движения B , предопределяющего номинальную скорость резания. Соотношение этих скоростей

$\varepsilon = \frac{v_A}{v_B}$ порядка 0,005 до 0,015, т. е. такое же, как при нарезании

резьбы. Из этого следует, что с точки зрения кинематики резания эти инструменты в процессе работы будут иметь примерно одинаковые изменения своих угловых параметров.

Схема 402 отличается от первой комбинации схемы 401 лишь тем, что равномерное прямолинейное движение A , сообщаемое инструменту, — как подача, — направлено не параллельно оси вращения движения B , сообщаемого изделию — как скорость резания, — а пересекает ее под произвольным углом, меньшим 90° . Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является коническая винтовая линия. Схема 402 находит практическое применение при обточке конических тел и обточке фасонными резцами с направлением подачи s под углом $\psi < 90^\circ$ к оси вращения обрабатываемых деталей.

Схема 403, как и схема 401, находит широкое практическое использование за счет комбинаций элементарных движений A и B .

На комбинации, при которой прямолинейное движение A сообщается инструменту вдоль оси Y , а вращательное движение B сообщается изделию вокруг оси X , основана обточка поверхностей фасонными резцами обычной конструкции, отрезка и подрезка торцев изделий резцами. Во всех этих случаях скорость v_A всегда меньше скорости v_B , в силу чего прямолинейное движение A является подачей, а вращательное движение B — скоростью резания. Отношение $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B}$ (порядка 0,0005)

непостоянно и по мере углубления инструмента в металл изделия постепенно увеличивается. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является архимедова спираль.

На комбинации, при которой прямолинейное движение A сообщается изделию, а вращательное движение B — инструменту, основана разрезка дисковыми пилами и фрезерование торцевыми фрезами. Аналогично первой комбинации, скорость $v_A < v_B$, в силу чего изделию сообщается движение подачи, а инструменту — движение скорости резания. Отношение $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} \approx 0,0005$, в отличие от первой комбинации, остается

постоянным на протяжении всей продолжительности резания. Траекторией относительного перемещения изделия и инструмента является трахоида (удлиненная циклоида).

Из сопоставления обеих рассмотренных комбинаций очевидно, что в рамках одной и той же принципиальной кинематической схемы резания возможно получить несколько методов обработки, типов режущих инструментов, условий их работы и различные траектории относительного перемещения в зависимости от того, какое движение (A или B) и скорость (v_A или v_B) сообщается инструменту и обрабатываемому изделию.

Схема 404 отличается от схемы 403 лишь тем, что вектор прямолинейного движения A перекрещивается под прямым углом с осью вращательного движения B . Несмотря на такую, казалось бы, несущественную разницу, обе ранее рассмотренные комбинации дают в рамках схемы 404 результаты, резко отличающиеся от таковых для схемы 403. На первой комбинации, при которой прямолинейное движение A сообщается инструменту, вращательное движение B — изделию и отношение $\varepsilon \approx 0,0005$, основаны точение тангенциальными фасонными резцами и новый, редко применяемый в современной технике, метод протягивания тел вращения плоскими протяжками. Этот метод почти совершенно не исследован, но представляет исключительный интерес как с теоретической, так и с практической стороны. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является перициклоида. На второй комбинации, при которой прямолинейное движение A сообщается изделию, вращательное движение B — инструменту и отношение $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} \approx$

$\approx 0,0005$, основано фрезерование дисковыми фрезами различных типов и назначений. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является трахоида.

Схема 405 теснейшим образом связана со схемами 403 и 404 и выражает предельный наклон вектора A , действующего в плоскости R перпендикулярно к оси и касательно к вращательному движению B . Если элементарное прямолинейное движение A сообщить изделию как движение подачи, а вращательное движение B — инструменту как скорость резания, то при отношении $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} \approx 0,005$ получаем весьма широко распространенные

методы фрезерования цилиндрическими фрезами и периферийного шлифования на плоскошлифовальных станках (полагая, что глубина резания t в обоих случаях столь мала по сравнению с диаметром фрезы или шлифовального камня, что можно допустить касание движений A и B ; в противном случае схема 405 переходит в схему 404). В последних двух рассмотренных случаях траекторией относительного перемещения является трахоида.

В схеме 406 вектор элементарного прямолинейного движения A действует в плоскости v и перекрещивается с осью вращательного движения B . Если прямолинейное движение A сообщить изделию (как в предыдущих схемах), а вращательное B — инструменту, то при отношениях $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} \approx 0,005$ получаем про-

цесс фрезерования дисковыми фрезами прямолинейных канавок эллиптического сечения. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является перекошенная винтовая линия на поверхности эллиптического цилиндра.

Схемы 501, 502, 504 и 506 пятой группы выражают два одновременно действующих вращательных движения A и B .

В схеме 501 оба вращательных движения направлены по часовой стрелке и имеют взаимно параллельные оси. В зависимости от соотношения $i = \frac{\omega_A}{\omega_B}$ схема 501 может быть положена в основу различных методов обработки металлов.

Первая комбинация: вращательное движение A сообщается инструменту как движение подачи, а вращательное движение B — изделию как скорость резания. При этой комбинации движений и соотношений $i = \frac{\omega_A}{\omega_B} \approx 0,003$ имеет место новый, до

настоящего времени мало исследованный и на практике весьма редко применяемый метод наружного протягивания тел вращения спиральными протяжками.

Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является перициклоида.

Вторая комбинация: вращательное движение A сообщается обрабатываемому изделию как движение подачи, а вра-

щательное движение B — инструменту как скорость резания. Эта комбинация движений при отношении $i \approx 0,005$ представляет сравнительно редко применяемый, но в технологии машиностроения уже давно известный метод фрезерования тел вращения. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является удлиненная эпициклоида.

В схеме 502 оба вращательных движения A и B направлены по часовой стрелке и имеют оси O_A и O_B , лежащие в горизонтальной плоскости XU и пересекающиеся под углом $0^\circ < \alpha^\circ < 90^\circ$. Если вращательное движение A сообщить инструменту как движение подачи, а вращательное движение B — изделию как скорость резания, то при отношениях $i = \frac{\omega_A}{\omega_B} \approx 0,003$ рассматриваемая

схема 502 является дальнейшим развитием ранее рассмотренной схемы 501 и на ней основан метод протягивания поднутренных поверхностей тел вращения вращающимися спиральными протяжками (фиг. 66). Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является пространственная циклическая кривая.

В схеме 504 оба вращательных движения A и B направлены по часовой стрелке. Ось вращения O_B лежит в горизонтальной плоскости XU параллельно координатной оси X . Ось вращения O_A лежит в вертикальной плоскости, параллельной плоскости YZ , и наклонена к координатной плоскости XU на угол $0^\circ < \beta^\circ < 90^\circ$. Если вращательное движение A сообщить инструменту, а B — изделию, то при отношениях $i = \frac{\omega_A}{\omega_B} \approx 0,005$ имеет

место зубофрезерование эвольвентно направленных зубцов на конических шестернях червячными коническими фрезами Клингелнберга. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является перекошенная винтовая линия, лежащая всеми своими точками на поверхности замкнутого кольца круглого сечения (тора).

В схеме 506 оба вращательных движения A и B действуют в направлении часовой стрелки. Ось O_B вращательного движения B лежит в горизонтальной плоскости XU , параллельной оси X . Ось O_A вращательного движения A лежит в вертикальной плоскости YZ и перекрещивается с осью O_B под прямым углом. Если вращательное движение A сообщить инструменту как скорость резания, а вращательное движение B — изделию как вспомогательное, кинематически согласованное с движением A и конструктивными элементами инструмента, то при отношениях $i = \frac{\omega_A}{\omega_B} = \frac{Z}{m}$ имеет место процесс зубофрезерования

червячными фрезами m заходных червячных колес с числом зубьев Z . Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является винтовая линия на поверхности тора.

Схемы 602, 608, 609, 610, 615, 616 и 617 шестой группы выражают три одновременно действующих движения:

- а) одно равномерное прямолинейное движение A ;
- б) одно равномерное вращательное движение B ;
- в) одно неравномерное возвратно-поступательное прямолинейное движение B .

На комбинации перечисленных трех движений основаны применяемые в инструментальном производстве методы затылования режущих инструментов.

Во всех схемах шестой группы равномерное вращательное движение B вокруг оси O_B , параллельной координатной оси X , сообщается изделию как скорость резания, а равномерное прямолинейное движение A и неравномерное возвратно-поступательное движение B , кинематически согласованные с вращательным движением B , сообщаются одновременно затыловочному инструменту как вспомогательные движения, предопределяющие закономерность затылуемых поверхностей на зубьях обрабатываемых инструментов. Движение подачи, так же как при строгании, сообщается затыловочному инструменту как четвертое движение в промежутках между рабочими ходами и поэтому принципиальными кинематическими схемами не учитывается.

В зависимости от комбинации прямолинейных движений A и B могут быть получены различные методы затылования.

В схеме 602 равномерное прямолинейное движение A действует в горизонтальной плоскости XU и пересекает ось O_B под углом $0^\circ < \alpha^\circ < 90^\circ$. Неравномерное возвратно-поступательное движение B действует вдоль координатной оси X . В результате суммирования обоих движений получим возможность осуществить боковое затылование конических и улиточных червячных фрез.

В схеме 608 по сравнению со схемой 602 оба рассматриваемых прямолинейных движения A и B меняются местами. В результате суммирования обоих движений может быть осуществлено боковое затылование цилиндрических червячных фрез.

В схеме 609 оба рассматриваемых прямолинейных движения A и B действуют в плоскости XU и пересекают ось O_B под углом $0^\circ < \alpha^\circ < 90^\circ$. Результирующее движение позволяет осуществить боковое затылование конических и улиточных фрез и при определенном отношении φ_A и φ_B дает результат, равноценный таковому по схеме 602.

По схеме 610 равномерное прямолинейное движение A направлено вдоль координатной оси Y и пересекает ось O_B под прямым углом. Неравномерное возвратно-поступательное прямолинейное движение B действует, как в схеме 609, в плоскости XU и пересекает ось O_B под углом $0^\circ < \alpha^\circ < 90^\circ$. В результате суммирования обоих прямолинейных движений A и B представляется возможным осуществить затылование боковых сторон зубьев спиральных протяжек для наружного протягивания тел вращения.

В схеме 615 равномерное прямолинейное движение A направлено вдоль координатной оси X , параллельно оси O_B , а неравномерное возвратно-поступательное движение B перпендикулярно к этим осям и направлено вдоль координатной оси Y . Результи-

рующая движений A и B позволяет осуществить затылование червячных фрез обычно применяемым методом и производить обточку резцами тел некруглого сечения (кулачков, эллипсов, граничных призм).

В схеме 616, по сравнению со схемой 610, оба прямолинейных движения меняются местами. В результате этого представляется возможным осуществить затылование конических и улиточных фрез.

Во всех рассмотренных случаях практического использования принципиальных кинематических схем шестой группы траекториями относительного перемещения затыловочного инструмента и затылуемого изделия является прерываемая обратным ходом в промежутках между рабочими циклами коническая винтовая линия.

В схеме 617 оба прямолинейных движения A и B действуют вдоль координатной оси Y . Получаемое при этом результирующее движение дает возможность осуществить процесс затылования вершин зубьев у спиральных протяжек для наружного протягивания тел вращения. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является плоскостная спираль, прерываемая обратным ходом в промежутках между рабочими циклами.

В отличие от рассмотренных схем шестой группы, в схеме 619 вращательное движение B сообщается инструменту как скорость резания, а обрабатываемому изделию сообщается равномерное прямолинейное движение A как подача и неравномерное возвратно-поступательное движение B как вспомогательное от копира. На одновременном действии всех трех движений основан метод копировально-фрезерной обработки фасонных поверхностей на призматических изделиях. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является удлиненная циклическая кривая, огибающая фасонный профиль обрабатываемой детали.

Схемы 701, 707, 706 и 742 седьмой группы основаны на сочетании трех одновременно действующих движений:

- а) двух равномерных вращательных движений A и B и
- б) одного равномерного прямолинейного движения B .

В схеме 701, в зависимости от отношения окружных скоростей $\epsilon = \frac{v_A}{v_B}$ или отношения угловых скоростей $i = \frac{\omega_A}{\omega_B}$ обоих вращательных движений, получаем три резко отличных между собой метода обработки.

Первый метод — обрабатываемому изделию сообщают вращательное движение A как движение подачи и прямолинейное движение B как вспомогательное, а инструменту — вращательное движение B как скорость резания. Тогда при отношениях окружных скоростей $\epsilon = \frac{v_A}{v_B} = 0,005$ получаем метод фрезерования винтовых канавок на цилиндрических поверхностях обрабатываемых изделий.

Второй метод — обрабатываемому изделию сообщают вращательное движение B как вспомогательное, а инструменту — вращательное движение A также как вспомогательное, связанное с вращением B кинематическим соотношением, и прямолинейное движение B , как скорость резания. Тогда при отношениях угловых скоростей $i = \frac{\omega_A}{\omega_B}$, соответствующих винтовым параметрам изделия и инструмента, имеет место метод зубодолбления долбьями цилиндрических шестерен со спиральными зубьями.

В обоих случаях траекториями относительного перемещения изделия и инструмента являются эпициклические кривые, расположенные в винтовом порядке относительно цилиндрических поверхностей обрабатываемых деталей.

Третий метод получим, если обрабатываемому изделию сообщено вращательное движение B , а инструменту — другое вращательное движение A и прямолинейное движение B как движение подачи. В данном случае нельзя рассматривать номинальную скорость резания как окружную скорость одного какого-либо вращательного движения, а лишь как производную от обоих движений A и B . При отношениях угловых скоростей $i = \frac{\omega_A}{\omega_B} \gg 2$ получаем возможность производить обточку на станках

и автоматах токарного типа тел граненого сечения (прямоугольного, шестиугольного и т. д.). Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является гипоциклическая винтовая линия.

В схеме 707 ось O_B вращательного движения B параллельна координатной оси X , ось O_A вращательного движения A , действующего в плоскости E , наклонена относительно вертикальной плоскости ZY на угол γ° , а равномерное прямолинейное движение B направлено вдоль осей X и O_B .

Подобно схеме 701, в зависимости от соотношений i и ε , схема 707 положена в основу двух известных методов обработки металлов.

Первый метод получим, если инструменту сообщить вращательное движение A как скорость резания и равномерное прямолинейное движение B как подачу, а обрабатываемому изделию — равномерное вращательное движение B как вспомогательное.

Тогда при отношениях окружных скоростей $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} \approx 0,005$ имеет место фрезерование червячными фрезами, работающими методом обкатки.

Второй метод получим, если инструменту сообщить вращательное движение A как скорость резания, а обрабатываемому изделию — вращательное движение B и равномерное прямолинейное движение B как вспомогательные, находящиеся во взаимном кинематическом отношении сообразно потребному винтовому параметру обрабатываемой детали. Тогда при отно-

шениях $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} \approx 0,005$ имеет место метод фрезерования дисковыми фрезами винтовых канавок.

В первом методе траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является перекошенная винтовая линия, лежащая на поверхности круглого цилиндра с винтовыми образующими и осью.

Во втором методе траекторией является в винтовом порядке расположенная эпициклическая кривая.

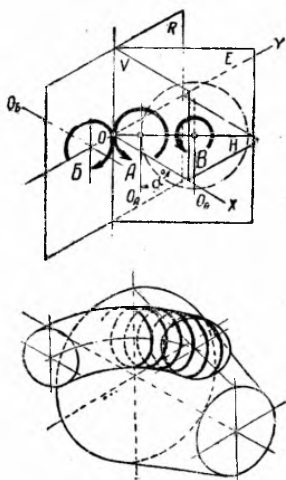
Отличие схемы 716 от 707 состоит лишь в изменении направления действия равномерного прямолинейного движения B , которое теперь не параллельно, а пересекает под углом α° оси X и O_B . Вследствие этого второй метод по схеме 707 превращается в аналогичный метод фрезерования конических винтовых канавок с постоянным шагом. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является в винтовом порядке расположенная эпициклическая кривая, огибающая коническую винтовую линию.

В схеме 742 ось O_B равномерного вращательного движения A параллельна координатной оси X . Ось O_A вращательного движения B пересекает координатную ось Y и пересекается с осью O_B под прямым углом. Равномерное прямолинейное движение B направлено вдоль оси O_A . Если инструменту сообщить вращательное движение A как скорость резания и прямолинейное движение B как вспомогательное, находящееся в определенном кинематическом соотношении с сообщаемым обрабатываемому изделию вращательным движением B , то при отношениях

$\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} = Z_k \frac{n_k}{n_\phi}$ (где Z_k — число зубьев колеса, n_k и n_ϕ — соответ-

ственное число оборотов колеса и фрезы) имеет место процесс осевого врезания червячными фрезами при фрезеровании червячных зубчатых колес. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является винтовая линия на поверхности круглого цилиндра с изогнутыми по эвольвенте образующими и осью.

Из всех принципиальных кинематических схем восьмой группы, основанных на сочетании трех одновременно действующих равномерных вращательных движений A , B и B , практическое использование нашла лишь одна схема (фиг. 7). На основе этой схемы работают зуборезные станки Глиссон, нарезающие конические



Фиг. 7.

зубчатые колеса с круговым зубом. В этом случае ось O_B вращательного движения B , действующего в вертикальной плоскости YZ , параллельна координатной оси X . Два других движения A и B , действующие в вертикальной плоскости E , имеют горизонтально расположенные оси O_A и O_B , наклоненные к координатной оси X под углом α° . Оси O_B и O_B неподвижны, ось O_A в процессе работы вращается с равномерной скоростью вокруг оси O_B . В целях нарезания круговых зубьев на конических зубчатых колесах, обрабатываемому изделию сообщается вращательное движение B находящееся в определенном кинематическом соотношении с сообщаемым инструменту вращательным движением B . Вращательное движение A также сообщается инструменту как скорость резания. Траекторией относительного перемещения инструмента и изделия является винтовая линия, лежащая всеми своими точками на поверхности эллиптического цилиндра с изогнутыми по эвольвенте образующими и осью.

Изложенный обзор охватывает наиболее распространенные методы обработки металлов резанием, но вполне допустимо, что отдельные случаи практического приложения принципиальных кинематических схем резания нами пропущены и не нашли своего отражения в табл. 2.

§ 4. ЭЛЕМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ РЕЗАНИЯ РЕЖУЩИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

Принципиальные схемы резания выражают абсолютные движения, которые на протяжении всего рабочего цикла сообщаются механизмом станка взаимодействующей паре инструмент—изделие.

Процесс резания, соответствующий тому или иному методу обработки металлов режущими инструментами, возможен лишь при неперенном условии, что одновременно действуют все предусмотренные кинематическими схемами абсолютные движения, которые в силу этого могут быть определены как главные движения процесса резания.

Большинство существующих методов обработки основано на реализации только главных движений и для своего осуществления ни в каких дополнительных движениях не нуждаются. Имеются однако и такие методы обработки, осуществление которых основано на реализации, наряду с главными движениями, также и некоторых дополнительных движений, не выраженных принципиальными кинематическими схемами.

Принципиальные кинематические схемы не могут быть отождествлены с каким-либо одним единственным, вполне определенным методом обработки. Как это с достаточной наглядностью видно из изложенного в § 3 обзора практического приложения кинематических схем, одной и той же кинематической схеме могут соответствовать несколько совершенно различных методов обработки.

Образование из элементарных движений одной кинематической схемы резания двух и более методов обработки может быть достигнуто:

- а) сообщением либо инструменту, либо изделию тех или иных элементарных движений рассматриваемой кинематической схемы;
- б) установлением вполне определенных соотношений линейных или угловых скоростей сочетаемых элементарных движений схемы, сообщаемых инструменту и изделию.

Главные движения, сообщаемые механизмом станка инструменту и изделию, приобретают в процессе резания, в зависимости от соотношения окружных или угловых скоростей, значения:

- а) скорости резания;
- б) непрерывно действующей подачи;
- в) вспомогательного движения, предопределяющего кинематическое соотношение движений инструмента и изделия, преднамеренно устанавливаемое с целью получения надлежащей конфигурации обработанной поверхности изделия (при обкатке зубчатых колес и обработке других сложных профилей).

Все перечисленные элементарные составляющие главных движений всегда являются абсолютными и поэтому явными движениями в процессе резания.

Дополнительные движения сообразно своему названию действительно дополняют выраженные в принципиальных кинематических схемах резания элементарные составляющие главных движений и увеличивают общее количество движений, необходимых для осуществления определенного метода обработки металлов резанием.

В отличие от главных, дополнительные движения никогда не приобретают в процессе резания значения скорости резания или вспомогательного движения и их действие всегда исчерпывается функциями, равноценными движению подачи.

Дополнительные движения могут быть осуществлены:

- а) как абсолютные прерывистые движения подачи, сообщаемые механизмом станка или вручную инструменту или изделию в промежутках между рабочими циклами;
- б) как конструктивные элементы, составляющие специфические особенности конструкции режущих инструментов и приводящие во время рабочего цикла к эффекту „скрытого движения подачи“.

Из числа подобных инструментов простейшими являются внутренние протяжки, конструкция которых предусматривает возможность реализации в процессе резания принципа скрытого движения подачи. Достигается этот эффект расположением каждого последующего зуба протяжки над предшествующим на величину, равную толщине срезаемой стружки a_z мм.

В более сложном проявлении этот же эффект достигается в работе спиральных протяжек для протягивания тел вращения. На этих протяжках, так же как на предназначенных для внутреннего протягивания, каждый последующий зуб расположен выше предшествующего на толщину слоя a_z мм, срезаемого

одним зубом. Кроме того, все зубья этой протяжки расположены в порядке винтовых линий. В процессе резания разность высот соседних зубьев приобретает значение глубины резания для каждого зуба. Скольжение контактных площадок на передних и задних поверхностях в осевом направлении вдоль вращающегося винтового режущего лезвия получает значение продольной подачи.

Эти два примера в достаточно полной мере позволяют уяснить механизм дополнительных движений, осуществляемых в процессе резания за счет специфических особенностей конструкции режущих инструментов.

Таким образом, все методы обработки металлов режущими инструментами основаны на сочетании нескольких абсолютных прямолинейных и вращательных движений, сообщаемых в процессе работы инструменту и изделию, и одного или нескольких дополнительных движений.

Сложность, технологические возможности, техническая и экономическая целесообразность каждого метода зависят от следующих факторов:

а) от количества и направления действия элементарных составляющих главных движений, сочетаемых в рамках одной принципиальной кинематической схемы;

б) от количества и характера проявления дополнительных движений;

в) от комбинации, в которой сочетаемые элементарные составляющие главных движений сообщаются обрабатываемому изделию и инструменту;

г) от отношения линейных или угловых скоростей сочетаемых движений, предопределяющих понятие о скорости резания и подаче;

д) от равномерности или неравномерности (прерывистости) действующих движений.

Все перечисленные факторы являются предметом кинематического исследования существующих и в практике используемых методов обработки металлов режущими инструментами. Равным образом эти же факторы составляют круг вопросов, подлежащих детальному исследованию при изыскании кинематических возможностей, позволяющих заменить устаревшие, менее эффективные, новыми, более эффективными технологическими приемами, основанными на использовании новых видов режущих инструментов.

§5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ У ИНСТРУМЕНТОВ, РАССМАТРИВАЕМЫХ В СОСТОЯНИИ ПОКОЯ И ДВИЖЕНИЯ

Определения геометрических параметров режущих элементов, сформулированные в существующих ОСТ, основаны на рассмотрении инструментов как пространственных геометрических тел, находящихся в состоянии покоя. В соответствии с этим представляется возможным рассматривать стандартные формулировки

как выражения определений геометрических параметров в статике.

На токарные, строгальные и долбежные резцы определения геометрических параметров в статике даны в ОСТ 6897-98 и основаны на понятиях;

- а) основной плоскости;
- б) главной секущей плоскости;
- в) плоскости резания.

В отношении резцов, имеющих плоскую опорную поверхность, с которой связано представление о положении основной плоскости, эти понятия весьма четки и ясны и в практическом использовании не вызывают никаких недоразумений.

Стремление чисто механически распространить эти же стандартные определения на остальные виды более сложных инструментов встречает затруднения из-за неопределенности представления о положении основной плоскости относительно тела инструмента, являющейся по существу исходной координатной плоскостью всей системы стандартных определений для резцов. Неизбежные при этом ошибки в расположении основной плоскости влекут за собой распространение ошибок и на всю геометрию режущих элементов. Встречающиеся в литературе противоречивые суждения о наиболее выгодной геометрии однотипных инструментов, работающих в одинаковых эксплуатационных условиях, в значительной своей части вызваны указанными обстоятельствами. Современное состояние науки о резании металлов и все растущие требования, предъявляемые к качеству инструментов, выдвигают на передний план необходимость привести в порядок наши представления о геометрии инструментов, рассматриваемых:

во-первых, как объекты расчета и конструирования с постановкой на исполнительных чертежах всех размеров, подлежащих точному выполнению в металле и последующему контрольному измерению;

во-вторых, как орудия, при помощи которых осуществляются определенные виды обработки машинных деталей резанием.

Решение первой части задачи выражается в изображении на чертежах соответствующих проекций, разрезов и в простановке размеров инструмента, рассматриваемого как пространственное твердотело, находящееся в состоянии покоя. Для осуществления этого мы нуждаемся в стандартных (по ОСТ 697-98) определениях геометрических параметров режущих элементов в статике.

Исходной базой для формулирования определений геометрических параметров в статике являются:

а) простота и доступность технологических приемов исполнения в металле заданных чертежом линейных и угловых размеров инструмента;

б) простота и доступность, а также достоверность контрольных измерений точности технологического исполнения на инструментах, заданных чертежом линейных и угловых размеров. Эти положения не зависят от того, в какой мере—полностью, частично,

с некоторым приближением или совсем не будут соответствовать определяемые на этой базе геометрические параметры в статике условиям работы инструмента.

Отрыв определяемых геометрических параметров в статике от условий реальной работы инструмента целесообразен не только в интересах облегчения технологических приемов изготовления и измерения последних, но также вполне допустим и с теоретической точки зрения. При использовании математического аппарата представляется возможным даже для самых неблагоприятных условий произвести надлежащий перерасчет геометрических параметров с одного сечения или направления на другое и с любой степенью точности учесть влияние условий работы инструмента на величину геометрических параметров в статике.

Решение второй части задачи теснейшим образом связано с движениями, совершаемыми в процессе работы поверхностями обрабатываемого изделия и срезаемой стружки относительно поверхностей контактных площадок инструмента.

В зависимости от сложности принципиальной кинематической схемы комбинации и соотношения линейных или угловых скоростей сочетаемых движений могут иметь место самые разнообразные (как по характеру, так и по сложности) траектории относительного перемещения инструмента и изделия. Характер и сложность траекторий относительного перемещения могут быть изменены, если одному и тому же инструменту сообщить другие элементарные, явные или скрытые, движения или же в достаточно широких пределах изменить соотношение скоростей движений, сообщаемых инструменту и изделию.

Взаимодействие металлов на трущихся поверхностях обрабатываемого изделия, срезаемой стружки и контактных площадках инструмента происходит в направлениях траекторий относительного перемещения этих поверхностей. Любые изменения, вносимые в характер и направление этих траекторий, неизбежно отражаются на проявлении износа трущихся контактных площадок инструмента и на стойкости последних.

Помимо указанных последствий любые изменения в характере и направлении траектории относительного перемещения непосредственно связаны с соответствующими изменениями абсолютной величины и направления измерения реально существующих геометрических параметров режущих элементов. Последние в процессе работы инструмента определяют действительную степень свободы перемещения его задних поверхностей относительно поверхности изделия и величину работы деформаций и трения в процессе стружкообразования.

В общем случае реальные геометрические параметры в процессе работы инструмента не тождественны с геометрическими параметрами в статике ни по величине, ни по направлению измерения. Поэтому возникает потребность в установлении новой системы определяющих кинематических геометрических параметров, рассматривающих инструмент не как пространственное геометрическое тело в состоянии покоя, а как орудие, совер-

шающее определенное рабочее движение относительно поверхности обрабатываемого изделия.

Исходной базой для формулирования определений геометрических параметров в движении является:

а) закономерность траекторий относительного перемещения режущих элементов инструмента и поверхностей изделия;

б) закономерность процесса деформации стружкообразования и направления сбега срезанной стружки по контактной площадке передней поверхности инструмента.

Если определения геометрических параметров в статике находят свое практическое приложение как руководящий норматив для надлежащей простановки размеров на чертежах конструируемых инструментов и контрольных измерений в процессе изготовления последних, то определение геометрических параметров в движении должно найти свое практическое приложение как техническое руководство при лабораторных исследованиях и нормировании режимов резания в условиях заводской эксплуатации режущих инструментов.

Взаимная согласованность абсолютных величин геометрических параметров обеих систем (статической и кинематической), как это было уже отмечено, может быть полностью осуществлена при помощи надлежащего математического перерасчета.

Определения геометрических параметров режущих инструментов в статике достаточно полно разработаны в настоящее время частью в ОСТ, частью отраслевыми и заводскими нормами и нашли широкое распространение, поэтому нет нужды рассматривать их в настоящей работе.

Геометрические параметры в движении составляют неотрывную составную часть рассматриваемых в настоящем труде общих вопросов кинематики резания. Ниже излагаются формулировки этих определений, основанные на вышеизложенной для этой цели исходной базе.

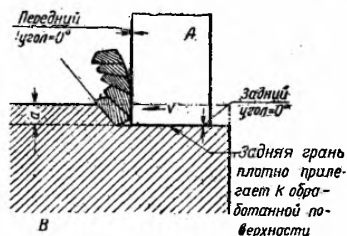
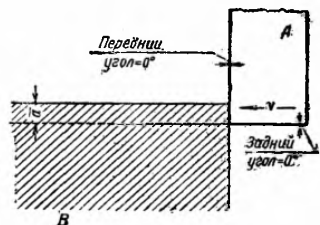
§ 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДНИХ УГЛОВ α_d и $\alpha_{заз}$

Непременным признаком правильности конструкции любого металлорежущего инструмента является возможность для всех без исключения точек его задней поверхности совершать в процессе резания без препятствий рабочее движение по траекториям относительного перемещения, предопределяемым принятой принципиальной кинематической схемой резания.

Если траектории относительного перемещения всех или части точек задней поверхности пересекают материальное тело обрабатываемого изделия, то беспрепятственное рабочее движение инструмента исключено. Вся задняя поверхность инструмента или часть ее упрется в поверхность резания изделия, и рабочее движение станет либо совершенно невозможным, либо будет сопровождаться выдавливанием задней поверхностью инструмента препятствующего его движению слоя металла изделия на всем пути относительного перемещения.

Подобное явление свидетельствует о том, что предусмотренные чертежом и технологически выполненные в металле задние углы недостаточны по величине и не согласованы с движениями, совершаемыми в процессе работы задними поверхностями. Из-за этого инструмент, нецелесообразно перегруженный выдавливанием металла изделия, может быть легко поломан и даст неудовлетворительное качество обработанной поверхности.

Основным геометрическим параметром, от которого зависит, может или не может режущий инструмент беспрепятственно совершить свое рабочее движение по траектории относительного рабочего перемещения, является задний угол.



Фиг. 8.

Определения задних углов в движении, выражающих реальную величину зазора между относительно перемещающимися в процессе резания задней поверхностью инструмента и поверхностью резания на изделии, теснейшим образом связаны с траекторией их относительного перемещения и понятием о простом и сложном рабочем движениях.

Рабочее движение является простым в тех случаях, когда, как это следует из принципиальных кинематических схем 101 и 301, любая точка режущего лезвия и вся задняя поверхность совершает во время рабочего хода (относительно поверхности резания) либо прямолинейное, либо

возвратно-поступательное, либо круговое движение при выключенном механизме подачи, т. е. когда в момент рабочего хода инструменту не сообщается движение подачи s , направленное на поверхность резания.

Схематический чертеж простого рабочего движения показан на фиг. 8.

В качестве режущего инструмента взят призматический брусок без каких-либо углов заточки, что равноценно выполнению на инструменте статических передних и задних углов, равных нулю. Режущее лезвие представлено ребром пересечения взаимно перпендикулярных плоскостей бруска — боковой, выполняющей функцию передней поверхности, и торцевой, выполняющей функцию задней поверхности.

Пусть обрабатываемое изделие неподвижно, а бруску сообщается от механизма станка прямолинейное движение справа налево со скоростью v м/мин. Механизм подачи остается без действия. Боковая сторона на пути своего движения срезает с поверхности изделия слой металла толщиной a мм и превра-

шает срезанный слой в стружку со всеми характерными для стружкообразования признаками деформаций. Образованная режущими элементами бруска-инструмента поверхность резания на изделии представляет собой плоскость, которую можно рассматривать как совокупность прямолинейных траекторий относительного перемещения точек режущего лезвия.

Задняя поверхность с задним углом, равным нулю, всеми своими точками плотно прилегает к поверхности резания на изделии. В этом случае размеры контактной площадки, на которой устанавливается взаимное давление в процессе резания, равны размерам всей задней поверхности.

Таким образом, брусок-инструмент, совершая простое рабочее движение (фиг. 8), преодолевает суммарное усилие резания, состоящее из:

- а) усилий деформации металла в объеме срезаемой стружки;
- б) силы трения сбегающей стружки о поверхность контактной площадки на передней поверхности;
- в) силы трения перемещающихся поверхностей резания на изделии относительно площадки на задней поверхности инструмента.

Все перечисленные слагаемые суммарного усилия резания в той или иной мере загружают любой нормально работающий металлорежущий инструмент при любых величинах геометрических параметров его режущих элементов. В рассматриваемом случае ничто, кроме сил трения и сопротивления процессу стружкообразования, не мешает рабочему движению инструмента. Поэтому для простого рабочего движения положительные задние углы не являются принципиально необходимыми, так как инструмент может совершать свое рабочее движение и при заднем угле, равном нулю.

В данном примере заточка положительных задних углов на теле инструмента имеет целью уменьшить размеры контактной площадки на задней поверхности как в начальный момент работы, так и на протяжении всего периода стойкости и, следовательно, уменьшить также приложенные к ней силы трения. В соответствии с этим затачиваемый на теле инструмента положительный задний угол с целью образования зазора между взаимно перемещающимися поверхностями может быть назван задним углом зазора $\alpha_{\text{заз}}$.

Оптимальная величина заднего угла зазора $\alpha_{\text{заз}}$ связана с механическими и физическими свойствами металла изделия и интенсивностью износа контактных площадок инструмента. Определение оптимальной величины этого угла является предметом экспериментального исследования.

Инструментов, у которых все точки режущего периметра лезвия совершают в процессе работы только простое рабочее движение, немного. К числу их относятся: строгальные и долбежные резцы, протяжки, зуборезные гребенки и им подобные.

Более часто простое рабочее движение имеет место на вспомогательных режущих лезвиях сложных инструментов, вектор

подачи s для которых касателен к примыкающим к ним поверхностям резания, относительно которых эти вспомогательные режущие лезвия совершают свое движение.

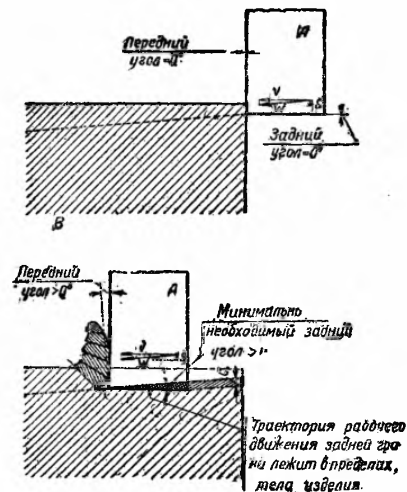
У большинства режущих инструментов, как это видно из рассмотренных в § 2 принципиальных кинематических схем резания и изложенного в § 3 обзора практического их приложения, точки режущего периметра всех или только главных режущих лезвий (следовательно и соответствующие им задние поверхности) совершают во время рабочего хода сложные рабочие движения по траекториям, слагающимся из двух или большего числа

одновременно действующих элементарных движений.

Схематический чертеж на фиг. 9 иллюстрирует простейший случай сложного рабочего движения.

Пусть в качестве режущего инструмента взят тот же призматический брусок со статическими углами, равными нулю как на передней, так и на задней поверхностях. Как и в предыдущей схеме (фиг. 8), обрабатываемое изделие неподвижно, а бруску-инструменту сообщаются два одновременно действующих равномерных движения:

а) прямолинейное движение справа налево со скоростью v м/мин;



Фиг. 9.

б) движение подачи s м/мин (или мм/об или мм/двойной ход), направленное на поверхность резания.

В результате действия этих двух элементарных движений режущее лезвие бруска совершает путь по наклонной траектории со скоростью W м/мин.

Благодаря наклонной траектории сложного рабочего движения, передний угол в процессе резания приобретает положительное значение, а задний, наоборот, отрицательное значение. Все точки задней (торцевой) поверхности бруска имеют траекториями своего относительного перемещения линии, пересекающие образованную режущим лезвием поверхность резания и проходящие в пределах металла изделия.

В данном случае осуществление сложного рабочего движения бруском-инструментом возможно лишь при условии мятия, пластического деформирования и выдавливания задней поверхностью слоя C материала изделия, препятствующего ее движению по направлению вектора W . После подобной работы (если она вообще возможна) задняя поверхность интенсивно изнашивается

и, притираясь к поверхности резания, принимает форму последней. В начале работы и до тех пор, пока не закончится процесс износа и притирки задней поверхности бруска к наклонной поверхности резания, суммарное усилие, загружающее брусок будет складываться из:

- а) усилий деформаций металла в объеме срезаемой стружки;
- б) силы трения сбегавшей стружки о поверхность контактной площадки на передней поверхности;
- в) силы трения поверхности резания о контактную площадку на задней поверхности;
- г) усилий деформаций сминаемого и выдавливаемого слоя C металла изделия незаточенной поверхностью торца бруска.

Последнее слагаемое является тем препятствием, преодоление которого конструкцией инструментов не предусматривается и поэтому, если подобное препятствие в процессе работы возникает вследствие либо неправильной конструкции, либо ошибочного или неточного изготовления геометрических параметров, режущие инструменты обладают весьма низкими эксплуатационными качествами, а в отдельных случаях совершенно не способны работать и ломаются от перегрузки. По мере износа и притирки задней поверхности к поверхности резания последнее слагаемое постепенно уменьшается и, начиная с момента, когда процесс износа и приработки закончился и устанавливается состояние, равноценное изображенному на схеме (фиг. 8), последняя слагающая станет равной нулю, и суммарное усилие резания будет состоять лишь из первых трех слагаемых.

Мягкие, пластические деформации и выдавливание слоя металла обработанной поверхности изделия незаточенной или неправильно заточенной задней поверхностью инструмента допустимы лишь в теоретических рассуждениях и совершенно недопустимы в условиях заводской практики.

Чтобы устранить выдавливание задней поверхностью инструмента слоя C металла изделия и создать условия для беспрепятственного совершения ею сложного рабочего движения, инструмент должен иметь некоторый обязательный задний угол, который в соответствии со своим происхождением может быть назван углом движения α_0 .

Применительно к простейшим кинематическим схемам, основанным на сочетании только двух движений, из которых одно является скоростью резания v м/мин, а другое подачей s м/мин, угол движения равен

$$\alpha_0 = \arctg \left(\frac{s}{v} \right). \quad (2)$$

Для инструментов с винтовой траекторией относительного перемещения, основанной на сочетании вращательного движения B и прямолинейного движения A согласно кинематической схеме 401, формула (2) примет вид

$$\alpha_0 = \arctg \left(\frac{s}{\pi D} \right) = \arctg \alpha, \quad (3)$$

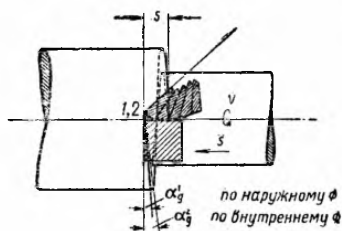
где s —подача, выраженная в мм за один оборот изделия;

D —диаметр изделия или инструмента в мм;

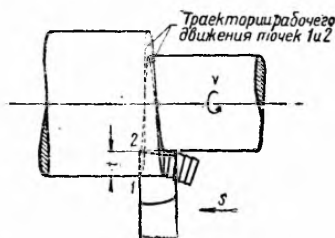
σ —угол подъема винтовой траектории.

Из формулы (3) видно, что для инструментов с винтовым рабочим движением (сверла, расточные резцы и т. д.) угол движения α_d есть величина переменная, зависящая от расстояния рассматриваемой точки режущего лезвия от оси вращения O_B (схема 401 табл. 2).

Для инструментов, рабочее движение которых основано на использовании принципиальных кинематических схем, дающих сложное рабочее движение, величина угла движения α_d выра-



Фиг. 10.



Фиг. 11.

жается более сложными формулами, общий вид которых приведен ниже.

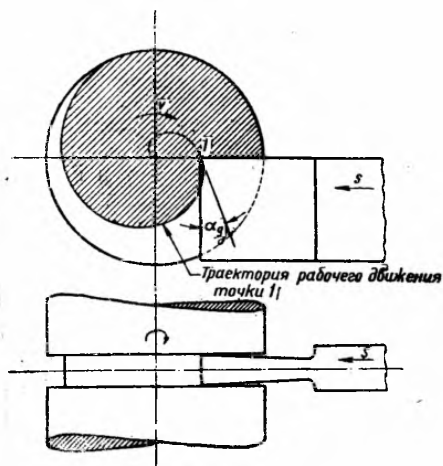
В качестве иллюстрации на фиг. 10—13 приведены схематические изображения некоторых инструментов четвертой группы. Пунктирными линиями показаны совершаемые режущими лезвиями или отдельными их точками траектории относительного перемещения и соответствующие им задние углы движения α_d . Число подобных схематических изображений может быть значительно расширено так как большинство режущих инструментов в процессе резания совершают сложные движения (токарные, отрезные, фасонные, автоматные, резьбовые резцы, сверла, метчики, зенкеры, развертки, плашки, фрезы всех типов, зуборезные инструменты). Наличие на них надлежащих по величине и направлению задних углов движения α_d является конструктивным признаком принципиального значения.

Заточка на инструментах со сложным рабочим движением задних углов

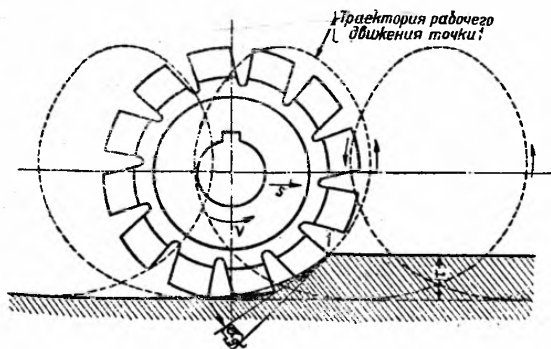
$$\alpha_{зат} = \alpha_0$$

исключает явления мятия, деформации и выдавливания задней поверхностью инструмента поверхностного слоя материала изделия и обеспечивает возможность беспрепятственного движения всех точек тела инструмента по траекториям их относительного перемещения. Однако при этом условии вся заточенная задняя поверхность всеми своими точками будет соприкасаться с поверхностью резания на изделии и скользить по ней, преодолевая возникающие при этом силы трения. Для разгрузки инструмента от сил трения недостаточно иметь $\alpha_{зат} = \alpha_0$; поэтому, как и в ранее рассмотренном случае простого рабочего движения, величину заднего угла заточки $\alpha_{зат}$ необходимо увеличить на величину заднего угла зазора $\alpha_{заз}$ и на теле инструмента иметь угол

$$\alpha_{зат} = \alpha_0 + \alpha_{заз}. \quad (4)$$



Фиг. 12.



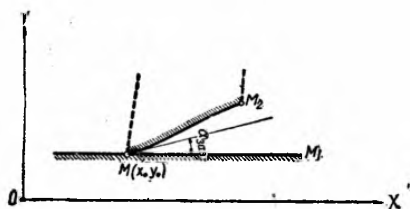
Фиг. 13.

Из изложенного в § 3 обзора практического приложения принципиальных кинематических схем резания видно, что в

Задний угол зазора $\alpha_{\text{зaz}}$, предназначенный, как это уже было установлено, для устранения в технически доступных пределах соприкосновения и связанного с ним трения между поверхностью резания Q и задней поверхностью U , должен, начиная от самого режущего лезвия $1-2$, обеспечить между этими поверхностями зазор достаточных размеров.

Если допустить, что наличный зазор недостаточен и не исключена возможность соприкосновения задней поверхности U инструмента с поверхностью резания Q изделия, то опасность соприкосновения может возникнуть лишь в направлениях наименьшего линейного расстояния между точками на взаимно перемещающихся поверхностях.

Так, в точке M режущего лезвия строгального резца наименьшие размеры заднего зазора могут быть только в плоскости N , проходящей через траекторию MM_1 , нормально к поверхности резания Q . На этом основании определению заднего угла зазора может быть дана следующая формулировка: „Задний угол зазора $\alpha_{\text{зaz}}$ в точке M режущего лезвия измеряется в плоскости N между касательными к траектории MM_1



Фиг. 15.

и к следу пересечения задней поверхности инструмента плоскостью N . Плоскость N проходит через линию MM_1 траектории простого рабочего движения нормально к поверхности резания Q “.

Пусть в координатной системе XY (фиг. 15), расположенной в плоскости N , линия MM_1 является траекторией простого рабочего движения точки $M(x_0y_0)$ режущего лезвия инструмента и выражается уравнением

$$y = \varphi(x). \quad (5)$$

Если считать, что координатная ось X параллельна линии MM_1 , то

$$\varphi'(x) = 0; \quad (6)$$

касательная к линии MM_1 сливается с самой линией MM_1 и выражается уравнением

$$y = y_0.$$

Линия MM_2 есть след пересечения задней поверхности инструмента плоскостью N и выражается уравнением

$$y = \psi(x). \quad (7)$$

Уравнение касательной к следу MM_2 в точке $M(x_0y_0)$

$$y = y_0 + \psi'(x)(x - x_0). \quad (8)$$

Так как касательная к траектории MM_1 простого рабочего движения параллельна оси X , угол заднего зазора разен углу наклона касательной к линии MM_2 в точке M и

$$\alpha_{\text{заз}} = \arctg [\psi'(x)]. \quad (9)$$

Сложное плоскостное рабочее движение

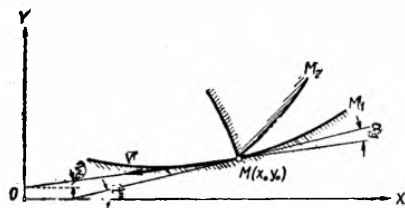
В качестве примеров, облегчающих формулирование определений задних углов α_d и $\alpha_{\text{заз}}$ для инструментов, совершающих в процессе резания сложное рабочее движение по плоскостным траекториям относительного перемещения, могут быть использованы схематические изображения отрезного резца и фрезы (фиг. 12—13).

Траекториями относительного перемещения каждой в отдельности рассматриваемой точки режущего лезвия являются:

а) для отрезного резца согласно кинематической схеме резания 403 и фиг. 12—архимедова спираль;

б) для зуба фрезы согласно кинематическим схемам резания 403 и 404 фиг. 13—трахоида.

Обе эти кривые всеми своими точками лежат в плоскости вращения N инстру-



Фиг. 16.

мента или изделия. Совокупность архимедовых спиралей в первом случае и отрезков трахоид во втором случае, воспроизводимых отдельными точками режущего лезвия, образует соответствующие поверхности резания на изделиях. Допустим, что отдельные точки задних поверхностей этих инструментов могут задеть за поверхность резания на изделиях, тогда для каждой в отдельности рассматриваемой линейной образующей этих поверхностей такая опасность угрожает лишь со стороны тех точек задней поверхности, которые лежат в плоскости движения N режущей точки M и в совокупности образуют след пересечения задней поверхности инструмента плоскостью N .

Так как в процессе резания оба рассматриваемых инструмента совершают сложное рабочее движение, то на основании вышеизложенного, сообразно соотношению скоростей элементарных движений, сообщаемых изделию и инструменту, угол движения α_d приобретает положительное значение и ему может быть дано следующее определение:

„Задний угол движения α_d измеряется в плоскости движения N между вектором элементарной составляющей данной кинематической схемы (определяющей номинальную скорость резания в точке M режущего лезвия инструмента) и касательной к плоскостной траектории сложного рабочего движения в той же точке M “.

Данному определению соответствует расчетная схема (фиг. 16).

Пусть в координатной системе XY , лежащей в плоскости N , вектор v представляет направление действия элементарной составляющей кинематической схемы резания, выражающей скорость резания, и наклонен к оси координат X под углом ω . Кривая MM_1 представляет траекторию сложного плоскостного рабочего движения и выражается уравнением

$$y = f(x).$$

Касательная к этой кривой в точке $M(x_0, y_0)$ выражается уравнением

$$y = y_0 + f'(x)(x - x_0)$$

и образует с той же осью координат X угол

$$\tau^\circ = \arctg [f'(x)].$$

Тогда задний угол движения α_∂ в точке $M(x_0, y_0)$

$$\alpha_\partial^\circ = \tau^\circ - \omega^\circ = \arctg [f'(x)] - \omega^\circ. \quad (10)$$

Если кривая MM_1 траектории сложного плоскостного движения представлена параметрическими уравнениями

$$y = \chi(t) \text{ и } x = \omega(t),$$

то уравнение касательной в точке $M(x_0, y_0)$

$$y = y_0 + \frac{\chi'(t)}{\omega'(t)}(x - x_0)$$

и угол

$$\tau^\circ = \arctg \left[\frac{\chi'(t)}{\omega'(t)} \right],$$

а задний угол движения

$$\alpha_\partial^\circ = \tau^\circ - \omega^\circ = \arctg \left[\frac{\chi'(t)}{\omega'(t)} \right] - \omega^\circ. \quad (11)$$

Заднему углу зазора $\alpha_{зз}$ на тех же основаниях, что и углу α_∂ , может быть дано следующее определение:

„Задний угол зазора $\alpha_{зз}$ в точке M режущего лезвия инструмента измеряется в плоскости движения N между касательной к плоскостной траектории сложного рабочего движения и касательной к следу пересечения задней поверхности инструмента плоскостью N “.

Данному определению соответствует расчетная схема (фиг. 17).

Плоскостная траектория сложного рабочего движения представлена кривой MM_1 , уравнение которой

$$y = u(x).$$

Уравнение касательной к кривой MM_1 в точке $M(x_0, y_0)$ режущего лезвия

$$y = y_0 + u'(x)(x - x_0).$$

Касательная образует с осью координат X угол

$$\tau = \arctg [u'(x)],$$

откуда

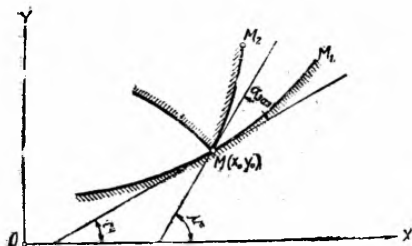
$$\operatorname{tg} \tau = u'(x).$$

След пересечения задней поверхности инструмента плоскостью N представлен кривой MM_2 , пересекает кривую траектории MM_1 в точке M и выражается уравнением

$$y = v(x).$$

Уравнение касательной к кривой MM_2 в точке $M(x_0, y_0)$ режущего лезвия

$$y = y_0 + v'(x)(x - x_0).$$



Фиг. 17.

Эта касательная образует с этой же осью X угол

$$\mu = \arctan [v'(x)],$$

откуда

$$\operatorname{tg} \mu = v'(x).$$

Из фиг. 17 имеем

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_{\text{заз}} &= \operatorname{tg} (\mu - \tau) = \\ &= \frac{\operatorname{tg} \mu - \operatorname{tg} \tau}{1 + \operatorname{tg} \mu \operatorname{tg} \tau}. \end{aligned}$$

Подставляя вместо $\operatorname{tg} \mu$ и $\operatorname{tg} \tau$ их значения, получаем

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{заз}} = \frac{v'(x) - u'(x)}{1 + u'(x)v'(x)}, \quad (12)$$

или

$$\alpha_{\text{заз}} = \arctan \left[\frac{v'(x) - u'(x)}{1 + u'(x)v'(x)} \right]. \quad (13)$$

Сложное пространственное рабочее движение

Большинство металлорежущих инструментов в процессе резания совершает рабочие движения по весьма сложным пространственным траекториям относительного перемещения. Действительные задний угол движения α_0 и задний угол зазора $\alpha_{\text{заз}}$ и в значительной мере интенсивность износа режущих элементов, а следовательно и стойкость инструмента, сами определяются характером и направлением совершаемых в пространстве сложных движений.

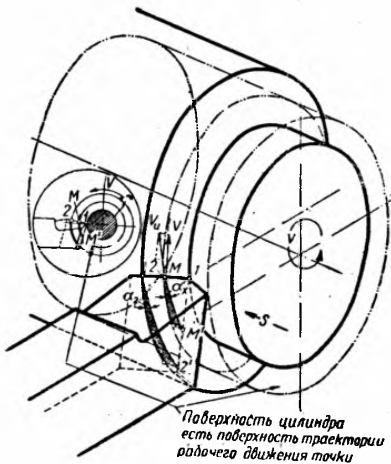
На инструментах со сложным пространственным движением для каждой в отдельности рассматриваемой точки M режущего лезвия опасность взаимного соприкосновения задней поверхности и поверхности резания возможна лишь в направлении пространственной траектории этой точки, описанной ею на поверхности движения.

В качестве примера, наиболее простого и доступного пространственному представлению и наглядно иллюстрирующего

вышеизложенные предпосылки для формулирования определений заднего угла движения α_0 и заднего угла зазора $\alpha_{зз}$, может быть использовано приведенное на фиг. 18 схематическое изображение токарного резца, совершающего в процессе резания сложное пространственное рабочее движение.

На режущем лезвии 1—2 резца взята произвольная точка M , в которой, согласно схеме 401, приложены два составляющих элементарных движения — окружная скорость резания v и осевое перемещение подачи s .

В итоге суммирования этих элементарных движений точка M режущего лезвия резца описывает относительно оси изделия винтовую линию, представляющую собой сложную пространственную траекторию перемещения точек задней поверхности резца, примыкающих к точке M_1 относительно поверхности резания. Образующая поверхности резания, с которой могут контактировать точки задней поверхности, примыкающие к точке M , воспроизведена в процессе резания самой точкой M , тождественна траектории ее относительного перемещения и лежит на поверхности движения. В рассматриваемом случае поверхность движения является поверхностью кругового цилиндра.



Фиг. 18.

Для устранения пластического деформирования и выдавливания поверхностного слоя металла задней поверхностью резца последняя должна быть заточена так, чтобы след ее пересечения поверхностью движения по крайней мере наложился бы всеми своими точками на сложную траекторию относительного перемещения, лежащую в той же поверхности движения и являющуюся пространственной образующей поверхности резания на изделии. Этому условию соответствует некоторая положительная величина заднего угла движения α_0 , определение которого может быть сформулировано так:

„Задний угол движения α_0 измеряется в плоскости, касательной к поверхности движения между направлением действия той элементарной составляющей кинематической схемы резания, которая в процессе резания предопределяет номинальную скорость резания v точки M режущего лезвия и касательной к пространственной траектории сложного рабочего движения в той же точке M “.

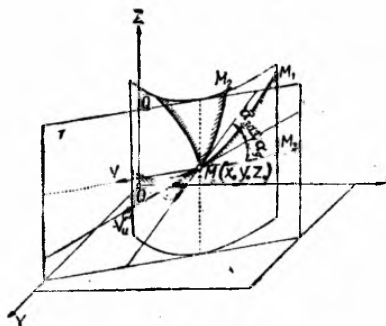
Данному определению соответствует расчетная схема на фиг. 19.

На поверхности движения Q , отнесенной к пространственным осям координат XYZ и выраженной уравнением

$$z = F(xy),$$

точка $M(x_0 y_0 z_0)$ изображает мгновенное положение режущего лезвия инструмента, перемещающегося по сложной пространственной траектории MM_1 , выраженной в параметрической форме уравнениями

$$x = \varphi(t); y = \psi(t); z = \chi(t).$$



Фиг. 19.

К точке M режущего лезвия примыкает след MM_2 пересечения задней поверхности инструмента поверхностью движения Q , выраженный уравнениями

$$x = \omega(t); y = u(t); z = v(t).$$

Вектор номинальной скорости резания v , выражающий соответствующую элементарную составляющую кинематической схемы резания, касателен к поверхности движения в точке M и параллелен плоскости XY .

Уравнение прямой MM_3 , проведенной через вектор v , а следовательно, и через точку $M(x_0 y_0 z_0)$ и составляющей с координатными осями углы ξ , η , μ :

$$\frac{x - x_0}{\cos \xi} = \frac{y - y_0}{\cos \eta} = \frac{z - z_0}{\cos \mu}.$$

Эта прямая лежит в плоскости T , касательной в точке $M(x_0 y_0 z_0)$ к поверхности движения Q . Уравнение касательной плоскости

$$\frac{\partial F}{\partial x}(xy)(x - x_0) + \frac{\partial F}{\partial y}(xy)(y - y_0) - (z - z_0) = 0.$$

Из условия, что вектор v лежит в касательной плоскости T и параллелен плоскости XY , следует равенство:

$$\frac{\partial F}{\partial x}(xy) = \cos \xi;$$

$$\frac{\partial F}{\partial y}(xy) = \cos \eta.$$

Тогда уравнение касательной плоскости

$$(x - x_0) \cos \xi + (y - y_0) \cos \eta - (z - z_0) = 0.$$

Уравнение касательной к сложной пространственной траектории рабочего движения в точке $M(x_0 y_0 z_0)$

$$\frac{x - x_0}{\varphi'(t)} = \frac{y - y_0}{\psi'(t)} = \frac{z - z_0}{\chi'(t)}.$$

Уравнение касательной к следу пересечения задней поверхности U инструмента поверхностью движения Q в той же точке $M(x_0 y_0 z_0)$

$$\frac{x - x_0}{\omega'(t)} = \frac{y - y_0}{u'(t)} = \frac{z - z_0}{v'(t)}.$$

Задний угол движения α_∂ , заключенный между вектором номинальной скорости резания и касательной к траектории сложного пространственного рабочего движения, может быть выражен уравнением

$$\cos \alpha_\partial = \frac{\varphi'(t) \cos \xi + \psi'(t) \cos \eta + \chi'(t) \cos \mu}{\sqrt{\varphi'(t)^2 + \psi'(t)^2 + \chi'(t)^2} \cdot \sqrt{\cos^2 \xi + \cos^2 \eta + \cos^2 \mu}}.$$

В написанном уравнении

$$\sqrt{\cos^2 \xi + \cos^2 \eta + \cos^2 \mu} = 1,$$

$$\cos \alpha_\partial = \frac{\varphi'(t) \cos \xi + \psi'(t) \cos \eta + \chi'(t) \cos \mu}{\sqrt{\varphi'(t)^2 + \psi'(t)^2 + \chi'(t)^2}}, \quad (14)$$

а задний угол зазора $\alpha_{зз}$, заключенный между касательной к траектории сложного пространственного рабочего движения и касательной к следу пересечения задней поверхности инструмента U поверхностью движения Q , выражается уравнением

$$\cos \alpha_{зз} = \frac{\varphi'(t) \omega'(t) + \psi'(t) u'(t) + \chi'(t) v'(t)}{\sqrt{\varphi'(t)^2 + \psi'(t)^2 + \chi'(t)^2} \sqrt{\omega'(t)^2 + u'(t)^2 + v'(t)^2}}, \quad (15)$$

Общая формулировка определений углов α_∂ и $\alpha_{зз}$

Определения задних углов α_∂ и $\alpha_{зз}$, изложенные в самостоятельных формулировках для плоскостного простого и сложного рабочих движений и пространственного сложного рабочего движения, могут быть обобщены и выражены следующими определениями.

1. Задний угол движения α_∂ измеряется между вектором номинальной скорости резания v и касательной к траектории рабочего движения в заданной точке.

2. Задний угол зазора $\alpha_{зз}$ измеряется между касательной к траектории рабочего движения данной точки режущего лезвия и касательной к следу пересечения задней поверхности инструмента U поверхностью движения Q .

3. Задние углы α_d и $\alpha_{заз}$ лежат в плоскости T , касательной к поверхности движения Q в заданной точке.

4. В частном случае, когда поверхность движения является плоскостью, задние углы α_d и $\alpha_{заз}$ лежат в плоскости движения N .

5. Величина заднего зазора, выраженная в линейных мерах, измеряется как расстояние между траекторией рабочего движения и следом пересечения задней поверхности инструмента поверхностью движения Q , следовательно, лежит в этой поверхности.

В инструментах со сложным профилем часть режущего периметра лезвия может совершить сложные рабочие движения, в то время как другая часть того же режущего периметра совершает простое рабочее движение. Такими участками чаще всего являются вспомогательные режущие лезвия, отделяющиеся от главных режущих лезвий достаточно резко выраженными переходами.

В случаях, когда в основу работы инструментов положены принципиальные кинематические схемы, состоящие из сочетания двух слагающих элементарных движений, из которых одно является номинальной скоростью резания v , а другое — подачей s , признаком, позволяющим отнести траекторию относительного перемещения какой-либо точки режущего периметра к разряду простого рабочего движения, является направление вектора s . В случаях, когда принципиальная кинематическая схема резания состоит из трех слагаемых элементарных движений, из которых одна составляющая является скоростью резания v , другая — подачей s , а третья — вспомогательным движением B , таким признаком является направление вектора I , равного геометрической сумме векторной подачи s и вспомогательного движения B .

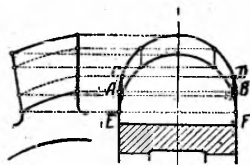
Относительное перемещение будет простым рабочим движением, если проекция вектора подачи s в первом случае или проекция вектора I во втором случае на нормаль к поверхности резания в рассматриваемой точке M режущего лезвия равна нулю или направлена от этой поверхности, а не на нее.

На те участки режущих лезвий, которые в процессе работы инструмента совершают простое рабочее движение, распространяются также и соответствующие определения и практическая ценность углов α_d и $\alpha_{заз}$; к другим участкам тех же режущих лезвий, совершающим в это же время сложное рабочее движение, необходимо применить определения α_d и $\alpha_{заз}$, данные для сложного движения.

Некоторые затруднения в установлении признаков, которыми следует руководствоваться при определении задних углов α_d и $\alpha_{заз}$, могут возникнуть при рассмотрении фасонных инструментов, режущие лезвия которых имеют плавный переход от главных к вспомогательным режущим лезвиям. По формальным признакам все точки режущего лезвия дуги AB (фиг. 20) фасонной фрезы совершают сложное плоскостное рабочее движение, а крайние точки A и B и примыкающие к ним участки AE и BF боковых сторон фрезы, имея поверхностью своего движения поверхность резания, совершают в это же время простое плоскостное движение.

Отсюда вытекает, что для определения величины и направления измерения задних углов α_d и $\alpha_{заз}$ во всех точках режущего лезвия дуги AB следует руководствоваться определениями, данными для инструментов, совершающих в процессе резания сложное рабочее движение. Для выражения величины и направления измерения заднего угла $\alpha_{заз}$ во всех точках лезвий на дугах AE и BF следует руководствоваться определениями, данными для инструментов, совершающих в процессе резания простое рабочее движение.

Однако эффективность применения задних углов α_d и $\alpha_{заз}$, определенных таким образом, может быть достигнута лишь на центральной части CD , тогда как на участках AC и BD из-за постепенного и плавного приближения точек полукруглого контура к плоскостям боковых сторон фрезы эффективность применения данных углов, определенных в отношении сложного рабочего движения, постепенно уменьшается. Это происходит по мере того, как линейные размеры зазора, выражающиеся как расстояние между задней поверхностью зуба фрезы и поверхностью резания, постепенно уменьшаются и угрожают при наличии даже незначительных дефектов на затылованной поверхности зуба привести к установлению контакта между последней и поверхностью резания.



Фиг. 20.

Во избежание подобной возможности необходимо, в порядке исключения из формальных правил, по крайней мере на тех частях отрезков AC и BD дуги AB , которые непосредственно примыкают к крайним точкам A и B , применить определения, данные не для сложного, а для простого рабочего движения. В практическом исполнении это означает применение метода бокового затылования в ущерб сохранности фасонного профиля при последующих переточках фрезы.

§ 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА НАКЛОНА φ_d ГЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ЛЕЗВИЯ

Стандартное определение предусматривает измерение главного угла в плане φ на токарных резцах между вектором подачи s и проекцией главного режущего лезвия на основную плоскость.

Это определение приемлемо с точки зрения расположения основной плоскости относительно тела резца и измерения заточенных углов. Однако оно становится неопределенным, как только мы попытаемся его распространить на остальные виды инструментов. Это объясняется тем, что положение основной плоскости относительно тела этих инструментов лишено прежней объективности и основано на чисто субъективных суждениях и, следовательно, может быть произвольным и ничем не связанным с процессом совершаемого резания.

Кроме того, стандартное определение главного угла в плане φ не отображает истинную величину геометрического угла, образованного вектором подачи s и направлением линии главного режущего лезвия. Следовательно, оно также не дает истинного соотношения между подачей s и толщиной срезаемой стружки a , с одной стороны, и между глубиной резания t и шириной этой стружки b — с другой. Таким образом формулы

$$a = s \cdot \sin \varphi,$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi},$$

содержащие номинальные углы в плане φ , выражают также и номинальные зависимости между этими параметрами поперечного сечения срезаемого слоя металла. Истинные величины толщины a и ширины b срезаемого сечения стружки, имеющие место в процессе резания, зависят от действительного угла наклона главного режущего лезвия φ_θ , измеренного как геометрический угол между вектором подачи s и прямолинейным главным режущим лезвием инструмента или касательной к криволинейному режущему лезвию в рассматриваемой точке M .

Зависимость между стандартным углом в плане и действительным углом φ_θ наклона главного режущего лезвия относительно вектора подачи s может быть выражена уравнением

$$\cos \varphi_\theta = \cos \varphi \cdot \cos \lambda, \quad (16)$$

из которого видно, что только при $\lambda=0$ углы φ и φ_θ равны между собой, а при всех как положительных, так и отрицательных значениях угла λ

$$\varphi_\theta > \varphi.$$

На токарных резцах, на которых абсолютная величина угла λ редко превышает 3° , можно пренебречь разницей в углах φ и φ_θ без каких-либо последствий практического порядка. Однако подобное пренебрежение при теоретических исследованиях работы токарных резцов и в особенности при стремлении распространить стойкостные и силовые закономерности, установленные при точении, на остальные виды режущих инструментов может привести к недопустимо большим ошибкам в математических формулах и к неправильному пониманию работы этих инструментов.

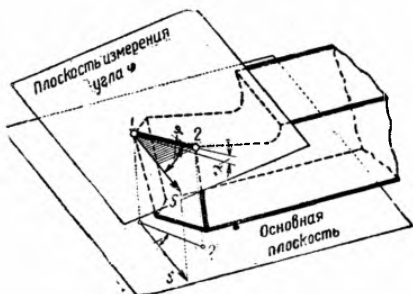
В основу формулировки определения угла наклона главного режущего лезвия φ_θ , так же как это было сделано при формулировке определений заднего угла, необходимо положить:

а) при рассмотрении инструментов в статическом состоянии — удобство простановки на чертежах исполнительных размеров, технологического их осуществления при изготовлении, удобство и возможность осуществления последующих контрольных измерений существующими измерительными средствами;

б) при рассмотрении инструментов в состоянии работы — истинное взаимное расположение главного режущего лезвия и поверхности резания, предопределяющее действительные физические параметры срезаемого слоя металла и размеры реально нагруженного периметра режущего лезвия инструмента.

Для угла наклона главного режущего лезвия в рабочем состоянии согласно схематическому изображению токарного резца (фиг. 21) может быть дано следующее определение:

„Угол наклона главного режущего лезвия φ_0 измеряется в плоскости, проходящей через вектор подачи s и касательную к режущему лезвию в данной точке M , и является геометрическим углом между этими двумя прямыми“.



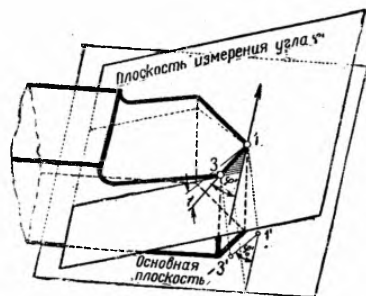
Фиг. 21.

§ 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА НАКЛОНА φ_0 ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО РЕЖУЩЕГО ЛЕЗВИЯ

В статическом состоянии инструмента главные и вспомогательные углы в плане φ и φ' его режущих лезвий теснейшим образом связаны почти полной аналогией определений. Эта общность может быть сохранена и в рабочем состоянии. Каждый из этих двух углов выражает положение соответствующего ему главного или вспомогательного режущего лезвия относительно образуемой им же поверхности резания и прямой, на которой лежит вектор подачи s . Однако по причинам, изложенным в § 7, для главного угла в плане φ стандартное определение вспомогательного угла в плане φ' является лишь номинальным выражением. Истинное расположение вспомогательного режущего лезвия на образуемой им части поверхности резания и относительно прямой, на которой лежит вектор подачи s , по аналогии с главным углом наклона φ_0 может быть выражено, согласно схематическому изображению на фиг. 22, следующим определением:

„Угол наклона вспомогательного режущего лезвия φ'_0 измеряется в плоскости, проходящей через вектор подачи s и касательную к режущему лезвию в данной точке M , и является геометрическим углом между этими двумя прямыми“.

„Угол наклона вспомогательного режущего лезвия φ'_0 измеряется в плоскости, проходящей через вектор подачи s и касательную к режущему лезвию в данной точке M , и является геометрическим углом между этими двумя прямыми“.



Фиг. 22.

тельную к вспомогательному режущему лезвию в данной точке M , и является геометрическим углом между этими двумя прямыми".

Зависимость между стандартным углом в плане φ' и действительным углом наклона вспомогательного режущего лезвия φ_θ может быть выражена равенством

$$\cos \varphi'_\theta = \cos \varphi' \cdot \cos \lambda', \quad (17)$$

где λ' — угол на вспомогательном режущем лезвии.

Так как в большинстве случаев $\lambda' \geq 0$, то, как общее правило, имеем $\varphi'_\theta > \varphi'$.

§ 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА СБЕГА СТРУЖКИ λ_θ

Производственный эффект ряда режущих инструментов в известной мере зависит от направления, в котором стружка, сбегая по передней поверхности, завивается и отводится прочь от инструмента.

Предположение о том, что это направление зависит от разности скоростей резания в различных точках режущего лезвия, не нашло своего экспериментального подтверждения.

Основным фактором, определяющим направление сбega и отклонения стружки, как это подтверждается опытами, является положение, занимаемое режущим лезвием и примыкающей к нему контактной площадкой на передней поверхности инструмента относительно вектора истинной скорости v_u . Отсюда следует, что отклонение стружки зависит не только от конструктивных элементов инструмента, но также и от его установки в эксплуатационных условиях. Та или другая установка одного и того же инструмента относительно вектора скорости резания может привести к противоположному эффекту в смысле отклонения стружки.

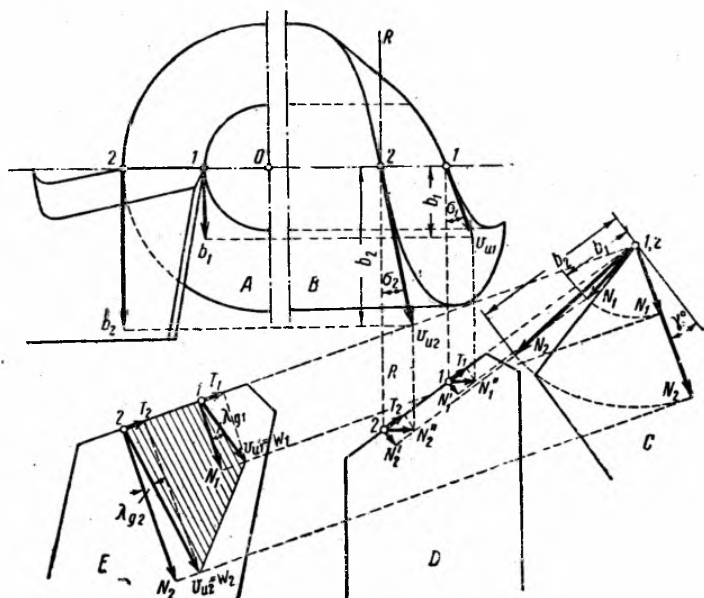
Стандартные определения угла отклонения стружки λ даны для инструментов, находящихся в статическом состоянии, и в настоящей работе не рассматриваются.

Несравненно больший интерес представляет действительный угол отклонения стружки λ_θ , формулировка определения которого дана на основании рассмотрения инструмента в движении.

На примере токарного резца удобнее всего иллюстрировать общую закономерность изменения λ_θ , в процессе относительного перемещения в зависимости от установки режущего лезвия выше, ниже или по центру вращения изделия.

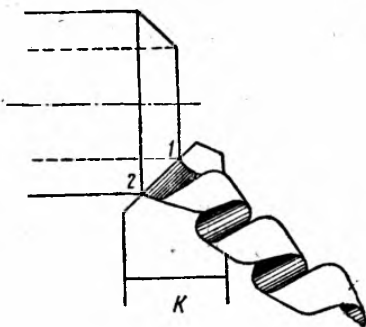
Рассмотрим изображенный на фиг. 23 токарный резец со статическим углом $\lambda = 0^\circ$. Все точки режущего лезвия 1—2 резца установлены на высоте центра вращения изделия O . Вектор истинной скорости v_{u1} касателен к винтовой траектории относительного рабочего движения в точке 1 и наклонен к плоскости R под углом подъема σ_1 (фиг. 23, *A*). Вектор истинной скорости v_{u2} касателен к винтовой траектории относительного движения в точке 2 и наклонен к этой же плоскости R под углом σ_2 .

На торцевом изображении изделия и резца (фиг. 23, А) оба вектора дают вертикальные и параллельные между собой проекции b_1 и b_2 , касательные к круговым проекциям винтовых траекторий в точках 1—2.



Для определения направления сбега и отклонения стружки в случае свободного резания разложим оба вектора v_{u1} и v_{u2} на слагаемые: вдоль режущего лезвия 1—2 и перпендикулярно к нему. Обозначим соответствующие слагаемые через T_1, T_2, N_1, N_2 . Тогда N'_1 и N'_2 будут проекциями слагающих N_1 и N_2 на фиг. 23, D резца в плане. Изображение истинных величин слагаемых N_1 и N_2 получим на фиг. 23, C.

В процессе резания стружка скользит по контактной площадке передней поверхности. Направление этого скольжения зависит от величины слагаемых T_1, T_2, N_1, N_2 векторов скорости резания v_{u1} и v_{u2} и от тех деформаций, которые имеют место в объеме металла сбегающей стружки.



Фиг. 23.

Влияние величины слагаемых T_1 , T_2 , N_1 , N_2 на направление сбега стружки можно выразить графически или математически. Учесть же влияние деформаций, претерпеваемых металлом в объеме срезаемой стружки на направление ее сбега, в настоящее время не представляется возможным. Однако, судя по результатам измерений, это влияние незначительно и можно ограничиться только учетом влияния слагаемых векторов скоростей v_{u1} и v_{u2} .

Для этого повернем слагаемые N_1 и N_2 вокруг режущего лезвия 1—2 до их совпадения с плоскостью передней поверхности резца, как это показано на проекции С. После поворота получим в плоскости передней поверхности (проекция Е) в точке 1 слагаемые T_1 и N_1 , а в точке 2—слагаемые T_2 и N_2 .

Геометрические суммы этих слагаемых в точках 1 и 2, представленные векторами $\bar{W}_1$ и $\bar{W}_2$, указывают наиболее вероятное направление сбега стружки по поверхности контактной площадки передней поверхности резца. Поступая аналогично для всех промежуточных точек режущего лезвия 1—2, получим эпюру векторов $\bar{W}$ направления сбега стружки.

Но так как

$$\bar{W}_1 = \bar{T}_1 + \bar{N}_1 = \bar{v}_{u1};$$

$$\bar{W}_2 = \bar{T}_2 + \bar{N}_2 = \bar{v}_{u2}$$

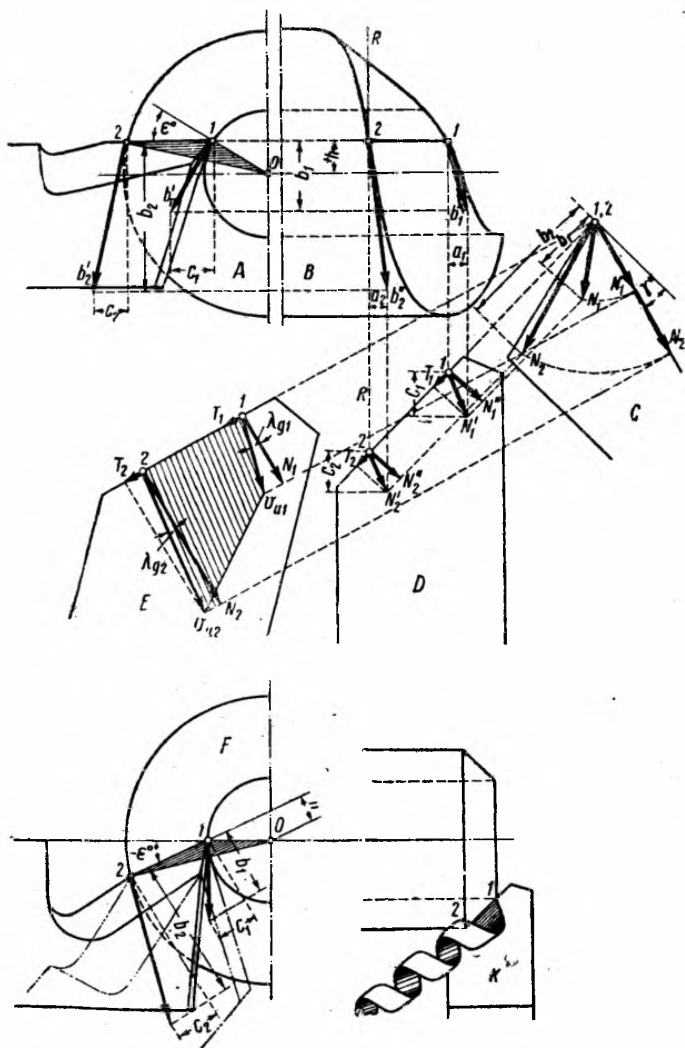
то эпюра векторов $\bar{W}$ направления сбега стружки является одновременно эпюрой векторов истинных скоростей резания на длине режущего лезвия 1—2.

В общем случае направление сбега стружки не совпадает с перпендикуляром к режущему лезвию, а образует с ней угол, равный по величине углу, образованному прямолинейным режущим лезвием резца (или касательной к криволинейному режущему лезвию) и перпендикуляром к вектору истинной скорости резания v_u . Этот угол по влиянию, оказываемому на процесс резания, равноценен статическому углу возвышения λ и может быть назван углом сбега λ_δ . Ему может быть дано следующее определение:

„Угол сбега стружки λ_δ измеряется между касательной к режущему лезвию в данной точке М и плоскостью, перпендикулярной к вектору истинной скорости резания в той же точке М“.

Возвращаясь к проекции Е на фиг. 23, замечаем, что вследствие разности скоростей резания v_{u1} и v_{u2} стружка, срезаемая на длине 1—2 режущего лезвия резца, имеет разную длину. Более длинная сторона будет, опережая менее длинную, забегать вперед и способствовать отклонению сбегающей стружки в сторону, противоположную направлению движения подачи s . В ту же сторону направлены слагаемые векторы T_1 и T_2 . Суммарное действие этих двух факторов в процессе резания вызывает такое же отклонение срезаемой стружки, какое дает положительный статический угол возвышения $+\lambda$ по ОСТ.

Установим теперь этот же резец со статическим углом $\lambda = 0^\circ$ выше центра вращения изделия на $+h$ мм. Тогда на фиг. 24, А



Фиг. 24.

векторы скоростей резания будут представлены проекциями b'_1 и b'_2 , касательными к окружностям радиуса точек 1 и 2 проекциями b_1 и b_2 , на вертикальную и c_1 и c_2 на горизонтальную оси.

На фиг. 24, В векторы скорости резания представлены проекциями b''_1 и b''_2 , касательными к винтовым траекториям относительного перемещения в тех же точках 1 и 2, проекциями b_1 и b_2 на вертикальную и a_1 и a_2 на горизонтальную оси.

На фиг. 24, D те же векторы скорости резания представлены проекциями N'_1 и N'_2 , построенными как геометрические суммы их горизонтальных проекций a_1 и a_2 на фиг. 24, В и c_1 и c_2 на фиг. 24, А.

Раскладывая проекции N'_1 и N'_2 векторов скоростей резания на нормальные и касательные направления к режущему лезвию в точках 1 и 2, находим на фиг. 24, D истинные величины касательных слагающих T_1 и T_2 и проекции нормальных слагающих N''_1 и N''_2 .

Истинные величины нормальных слагающих N_1 и N_2 могут быть найдены на фиг. 24, С как геометрические суммы проекций N''_1 и N''_2 и проекций b_1 и b_2 на вертикальную ось на фиг. 24, А.

Повернув обе нормальные слагаемые N_1 и N_2 до их совмещения с плоскостью передней поверхности, получим в этой плоскости на фиг. 24, Е истинные величины слагающих T_1 , T_2 , N_1 , N_2 . Складывая их, получим результирующие векторы v_{u1} и v_{u2} , указывающие наиболее вероятное направление сбегания стружки при установке резца выше центра изделия.

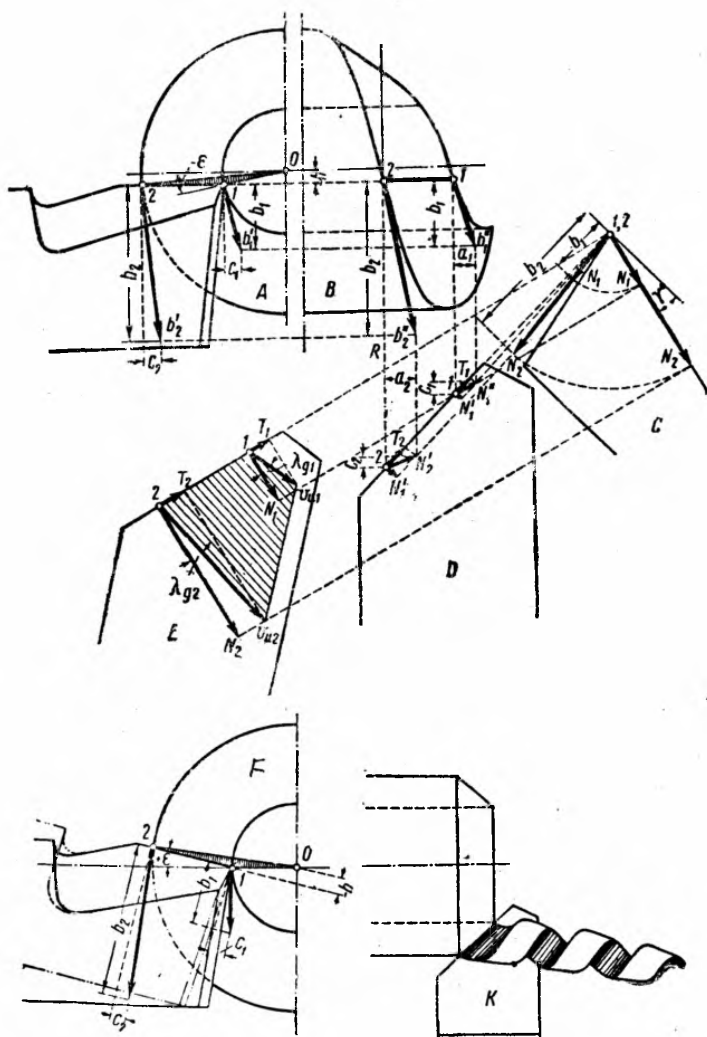
Разность скоростей резания v_{u1} и v_{u2} способствует забеганию стружки вперед более длинной стороной и отклонению ее в сторону, в данном случае противоположную направлению движения подачи s . Касательные слагаемые T_1 и T_2 , наоборот, толкают стружку в том же направлении, в каком действует подача s . В конечном итоге действительное отклонение стружки определяется суммарным действием этих двух противоположных направлений. Оно будет таким же, какое дает отрицательный статический угол λ по ОСТ.

Установка резца со статическим углом $\lambda = 0$ ниже центра вращения изделия на величину h мм приводит к результатам, обратным получаемым при установке резца выше центра.

На фиг. 25, А проекции b'_1 и b'_2 векторов скорости резания, а также касательные слагающие T_1 и T_2 на фиг. 25, D и Е отклонены или направлены в противоположную сторону по сравнению с установкой выше центра. Суммарное действие разностей скорости резания и касательных слагаемых T_1 и T_2 в точках 1—2 режущего лезвия резца определяет действительное направление сбегания стружки, аналогичное таковому при положительном статическом угле λ по ОСТ.

Повернем резцы, установленные выше или ниже центра изделия, так, как показано на фиг. 24, F и 25, F. При положении точки 1 режущего лезвия по центру остальные точки (фиг. 24)

расположатся ниже центра и действительно дадут такой же результат, как если бы мы заточили резец с отрицательным статическим углом λ . При расположении точек, показанных на фиг. 25,



Фиг. 25.

результат будет таким, как если бы резец был заточен с положительным статическим углом λ и тело резца было бы изготовлено по контуру, показанному условной линией.

Таким образом, угол сбега стружки λ_∂ зависит не только от величины заточенного на теле резца статического угла λ , но также и от установки режущего лезвия выше или ниже центра вращения изделия, т. е. от расположения режущего лезвия относительно вектора скорости резания v_u .

Угол между нормалью и действительным направлением скольжения стружки по контактной площадке передней поверхности инструмента может быть в первом приближении принят равным углу сбега стружки λ_∂ . В соответствии с ранее данным определением величина угла λ_∂ может быть выражена двумя уравнениями.

В случае, когда касательная к режущему лезвию в точке $M(x_0, y_0, z_0)$ выражается уравнением

$$\frac{x-x_0}{m} = \frac{y-y_0}{n} = \frac{z-z_0}{p},$$

а прямая, на которой лежит вектор скорости резания v в той же точке $M(x_0, y_0, z_0)$, уравнением

$$\frac{x-x_0}{m_1} = \frac{y-y_0}{n_1} = \frac{z-z_0}{p_1},$$

угол, образуемый этими прямыми, определяется по формуле

$$\cos \psi = \frac{mm_1 + nn_1 + pp_1}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2} \cdot \sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}},$$

а угол сбега

$$\lambda_\partial = 90^\circ - \psi,$$

откуда

$$\sin \lambda_\partial = \frac{mm_1 + nn_1 + pp_1}{\sqrt{m^2 + n^2 + p^2} \cdot \sqrt{m_1^2 + n_1^2 + p_1^2}}. \quad (18)$$

В тех случаях, когда без особых затруднений могут быть найдены направляющие косинусы углов прямолинейного режущего лезвия или же касательной к криволинейному режущему лезвию

$$\cos \alpha_1; \cos \beta_1; \cos \gamma_1$$

и прямой, совпадающей с направлением вектора скорости резания в той же точке

$$\cos \alpha_2; \cos \beta_2; \cos \gamma_2,$$

то угол между этими прямыми может быть выражен уравнением

$$\cos \psi = \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \cos \beta_1 \cos \beta_2 + \cos \gamma_1 \cos \gamma_2, \quad (18a)$$

а угол сбега стружки λ_∂ уравнением

$$\sin \lambda_\partial = \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \cos \beta_1 \cos \beta_2 + \cos \gamma_1 \cos \gamma_2. \quad (19)$$

§ 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДНИХ УГЛОВ γ_∂

В процессе резания передняя поверхность инструмента, вступая в соприкосновение с изделием, давит на подлежащий снятию слой металла с силой, необходимой и достаточной для пласти-

ческого деформирования, разрушения, срезания и отвода его в виде стружки. Контактная площадка передней поверхности служит той опорой, по которой срезаемая стружка сбегает и которую она истирает на протяжении всего периода работы инструмента.

Направление сбega стружки по контактной площадке определяется углом сбega стружки λ_∂ . Очевидно, интегральное усилие резания также зависит от этого направления, и эффективная величина переднего угла в процессе резания поэтому должна быть измеряема не в нормальном направлении, а в том, в котором в действительности сбегает стружка, т.е. под углом λ_∂ к нормали.

Передние углы γ_∂ в состоянии движения и работы инструмента предопределяют весь процесс деформации, разрушения, срезания и трения стружки о контактную площадку передней поверхности. В отличие от определения статических углов в основу определения передних углов в движении γ_∂ должны быть положены:

- а) траектория рабочего движения или направление вектора истинной скорости v_u в рассматриваемой точке режущего лезвия;
- б) напряжение действительного сбega стружки по передней поверхности инструмента.

В соответствии с этим переднему углу γ_∂ в процессе резания может быть дано следующее определение:

„Передний угол γ_∂ в рабочем состоянии инструмента измеряется между плоскостью, перпендикулярной к вектору истинной скорости резания v_u и касательной к передней поверхности, проведенной в направлении действительного сбega стружки под углом λ_∂ к нормали“.

Непосредственное измерение переднего угла γ_∂ невозможно и его величина может быть вычислена лишь математически.

Траектория рабочего движения может быть представлена касательной, на которой лежит вектор истинной скорости резания v_u в точке $M(x_0 y_0 z_0)$. Уравнение этой касательной

$$\frac{x - x_0}{\cos \alpha_1} = \frac{y - y_0}{\cos \beta_1} = \frac{z - z_0}{\cos \gamma_1}.$$

Уравнение плоскости, перпендикулярной к вектору истинной скорости резания v_u в той же точке,

$$(x - x_0) \cos \alpha_1 + (y - y_0) \cos \beta_1 + (z - z_0) \cos \gamma_1 = 0.$$

Полагая известными направляющие косинусы у прямой, касательной к контактной площадке на передней поверхности и проведенной под углом λ_∂ к нормали, получим ее уравнение

$$\frac{x - x_0}{\cos \alpha_2} = \frac{y - y_0}{\cos \beta_2} = \frac{z - z_0}{\cos \gamma_2}.$$

Тогда уравнение для переднего угла γ_∂ в движении будет иметь вид

$$\sin \gamma_\partial = \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \cos \beta_1 \cos \beta_2 + \cos \gamma_1 \cos \gamma_2}{\sqrt{\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \beta_1 + \cos^2 \gamma_1} \cdot \sqrt{\cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \beta_2 + \cos^2 \gamma_2}}. \quad (20)$$

§ 11. ПРИЛОЖЕНИЕ ФОРМУЛ ДЛЯ ВЫРАЖЕНИЯ УГЛОВ В ДВИЖЕНИИ К ТОКАРНЫМ РЕЗЦАМ, СВЕРЛАМ, МЕТЧИКАМ И ФРЕЗАМ

Общие виды уравнений для определения углов α_∂ , $\alpha_{заз}$, λ_∂ , γ_∂ действительны для всех видов инструментов. Однако благодаря сложности принципиальной кинематической схемы резания и комбинации сочетаемых элементарных движений, различные виды инструментов могут иметь самые разнообразные величины своих геометрических параметров и совершать рабочие движения по самым разнообразным траекториям относительного перемещения. Ввиду этого общие уравнения для перечисленных выше углов в движении приобретают в каждом случае свои конкретные выражения, учитывающие особенности геометрических параметров рассматриваемого вида инструмента и их относительное перемещение в процессе работы.

Конкретизация общих видов уравнений для всех углов в движении применительно к каждому из иллюстрированных в § 3 видов инструментов требует колоссальной работы чисто математического порядка, что не является задачей настоящей работы. Поэтому здесь мы ограничиваемся изложением уравнений для α_∂ , $\alpha_{заз}$, λ_∂ и γ_∂ лишь для наиболее часто употребляемых инструментов.

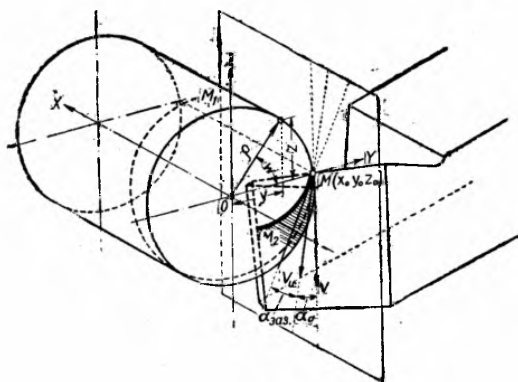
§ 1. Углы в движении α_∂ , $\alpha_{заз}$, λ_∂ и γ_∂ на токарных резцах

В соответствии с данными в § 6 определениями для заднего угла движения α_∂ и заднего угла зазора $\alpha_{заз}$ необходимо написать уравнения:

а) линии, на которой лежит вектор v нормальной скорости резания;

б) касательной к винтовой траектории MM_1 сложного пространственного рабочего движения точки M главного режущего лезвия;

в) касательной к следу MM_2 пересечения задней поверхности резца с цилиндрической поверхностью относительного



Фиг. 26.

ного движения точки M главного режущего лезвия.

Как это вытекает из расчетной схемы (фиг. 26), уравнение линии, на которой лежит вектор v номинальной скорости резания в точке $M(x_0, y_0, z_0)$, имеет вид

$$\frac{x - x_0}{0} = \frac{y - y_0}{\rho \sin \omega} = \frac{z - z_0}{\rho \cos \omega} \quad (21)$$

Уравнения винтовой траектории MM_1 сложного пространственного рабочего движения точки M режущего лезвия резца:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{s}{2\pi} \omega; \\ y &= \rho \cos \omega; \\ z &= \rho \sin \omega. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Первые производные от уравнения (22):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{d\omega} &= \frac{s}{2\pi}; \\ \frac{dy}{d\omega} &= -\rho \sin \omega; \\ \frac{dz}{d\omega} &= \rho \cos \omega. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Тогда уравнение касательной к винтовой траектории MM_1 сложного пространственного рабочего движения в точке $M(x_0, y_0, z_0)$

$$\frac{x - x_0}{\frac{s}{2\pi}} = -\frac{y - y_0}{\rho \sin \omega} = \frac{z - z_0}{\rho \cos \omega}. \quad (24)$$

Угол, заключенный между касательной к винтовой траектории относительного рабочего движения в точке $M(x_0, y_0, z_0)$, выраженной уравнением (24), и линией, на которой лежит вектор v номинальной скорости резания, выраженной уравнением (21), является задним углом движения α_d , и общий вид уравнения (14), данный в § 6, применительно к токарному резцу будет

$$\cos \alpha_d = \frac{\frac{s}{2\pi} \cdot 0 + \rho^2 \sin^2 \omega + \rho^2 \cos^2 \omega}{\sqrt{\left(\frac{s}{2\pi}\right)^2 + \rho^2 \sin^2 \omega + \rho^2 \cos^2 \omega} \cdot \sqrt{\rho^2 \sin^2 \omega + \rho^2 \cos^2 \omega}}.$$

После преобразований и сокращения

$$\cos \alpha_d = \frac{2\pi\rho}{\sqrt{(2\pi\rho)^2 + s^2}} = \cos \sigma. \quad (25)$$

Для всех видов инструментов, имеющих траекторией относительного рабочего движения винтовую линию, в том числе и для токарных резцов, угол движения α_d равен углу σ подъема винтовой траектории.

Чтобы выразить математическим уравнением плоскость главной задней поверхности токарного резца, отнесем его к пространственным координатным осям XYZ , как показано на фиг. 27.

Направляющие косинусы перпендикуляра OM , опущенного из точки O начала координат на плоскость главной задней поверхности резца:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \cos \alpha \sin \varphi; \\ \cos \beta_1 &= \cos \alpha \cos \varphi; \\ \cos \gamma_1 &= \sin \alpha. \end{aligned}$$

Тогда уравнение касательной к следу MM_2 пересечения задней поверхности резца с цилиндрической поверхностью движения радиуса ρ в точке $M(x_0, y_0, z_0)$

$$\frac{\sin \varphi (x - x_0)}{\rho (\cos \varphi \sin \omega - \operatorname{tg} \alpha \cos \omega)} = -\frac{y - y_0}{\rho \sin \omega} = \frac{z - z_0}{\rho \cos \omega}. \quad (29)$$

Угол, заключенный между касательной и сложной пространственной траекторией относительного рабочего движения, выраженный уравнением (24), и касательной к следу пересечения задней поверхности резца цилиндрической поверхностью движения, выраженной уравнением (29), является задним углом зазора $\alpha_{\text{зад}}$, и общий вид уравнения (15) применительно к токарному резцу будет

$$\cos \alpha_{\text{зад}} = \frac{\frac{\rho^2}{2\pi \sin \varphi} (\cos \varphi \sin \omega - \operatorname{tg} \alpha \cos \omega) + \rho^2 \sin^2 \omega + \rho^2 \cos^2 \omega}{\sqrt{\frac{\rho^2}{\sin^2 \varphi} (\cos \varphi \sin \omega - \operatorname{tg} \alpha \cos \omega)^2 + \rho^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{s}{2\pi}\right)^2 + \rho^2}},$$

или после сокращения и принятия условия, что для точки M угол $\omega = \varepsilon = \arcsin \left(\frac{h}{\rho}\right)$

$$\cos \alpha_{\text{зад}} = \frac{\frac{s}{2\pi} (\cos \varphi \sin \varepsilon - \operatorname{tg} \alpha \cos \varepsilon) - \rho \sin \varphi}{\sqrt{\sin^2 \varphi + (\cos \varphi \sin \varepsilon - \operatorname{tg} \alpha \cos \varepsilon)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{s}{2\pi}\right)^2 + \rho^2}}. \quad (30)$$

Для определения угла сбегания стружки λ_θ на токарных резцах необходимо знать:

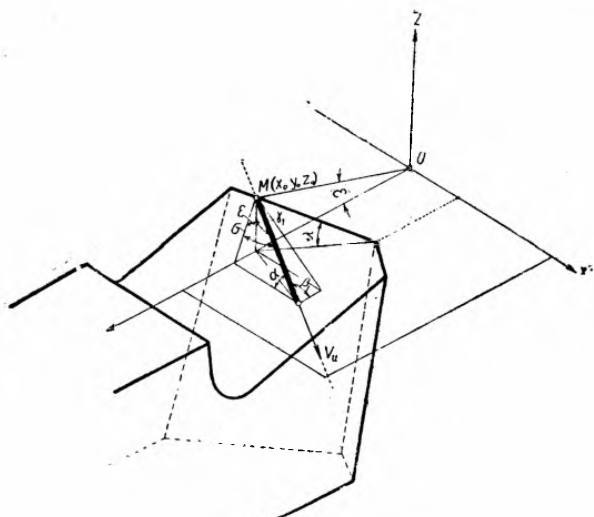
а) направляющие косинусы вектора истинной скорости резания v_u ;

б) направляющие косинусы главного режущего лезвия 1—2.

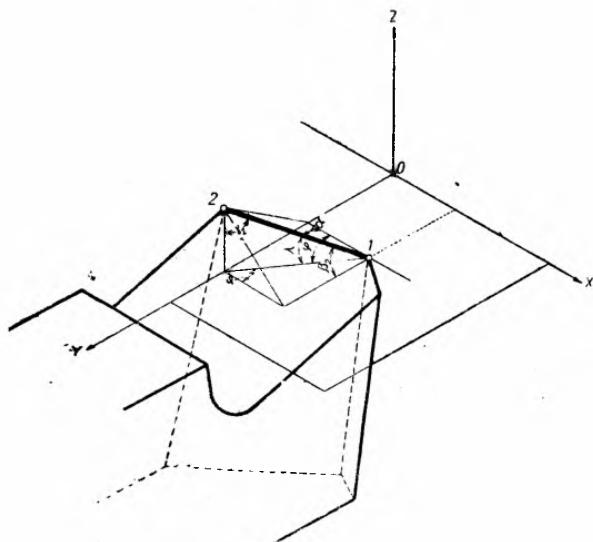
Токарный резец с положительным статическим углом возвышения $+\lambda > 0$ на расчетной схеме (фиг. 28) отнесен к пространственным координатным осям XYZ . Ось X совпадает с осью вращения обрабатываемого изделия. Вектор истинной скорости резания v_u в противоположной точке $M(x_0, y_0, z_0)$ главного режущего лезвия пересекает плоскость xu в точке M_2 и образует с осью X угол α_1 , с осью Y — угол β_1 и с осью Z — угол γ_1 . Величины этих углов, как это вытекает из расчетной схемы, выражаются равенствами:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \sin \sigma; \\ \cos \beta_1 &= \cos \sigma \sin \varepsilon; \\ \cos \gamma_1 &= \cos \sigma \cos \varepsilon. \end{aligned}$$

На фиг. 29 тот же резец отнесен к тем же пространственным координатным осям. Главное режущее лезвие 1—2 образует с осью X угол α_2 , с осью Y — угол β_2 и с осью Z — угол γ_2 .



Фиг. 28.



Фиг. 29.

Величины этих углов на основании расчетной схемы (фиг. 29) выражаются равенствами:

$$\begin{aligned}\cos \alpha_2 &= \cos \varphi \cos \lambda; \\ \cos \beta_2 &= \sin \varphi \cos \lambda; \\ \cos \gamma_2 &= \cos (90 - \lambda) = \sin \lambda.\end{aligned}$$

Подставляя значения направляющих косинусов вектора истинной скорости резания v_u и главного режущего лезвия и найденный в § 9 общий вид уравнения (19), получаем для токарного реза

$$\sin \lambda_\partial = \cos \varphi \cos \lambda \sin \sigma + \sin \varphi \cos \lambda \cos \sigma \sin \varepsilon + \sin \lambda \cos \sigma \cos \varepsilon. \quad (31)$$

Для точки 1 вершины токарного реза координата $z_0 = 0$, следовательно, угол $\varepsilon = 0$ и уравнение (31) принимает вид

$$\sin \lambda_\partial = \cos \varphi \cos \lambda \sin \sigma + \sin \lambda \cos \sigma. \quad (32)$$

Для токарного реза со статическим углом возвышения $\lambda = 0$ и изделия, установленного всеми точками по центру вращения уравнение (31) принимает вид

$$\sin \lambda_\partial = \cos \varphi \sin \sigma. \quad (33)$$

Для токарного реза со статическим углом возвышения $\lambda = 0$, но установленного всеми точками выше центра вращения изделия на $+h$ мм, уравнение (31) принимает вид

$$\sin \lambda_\partial = \cos \varphi \sin \sigma + \sin \varphi \cos \sigma \sin \varepsilon. \quad (34)$$

Для определения переднего угла γ_∂ , как это следует из § 10 необходимо знать:

а) уравнение плоскости, перпендикулярной к вектору истинной скорости резания v_u в точке $M(x_0, y_0, z_0)$ главного режущего лезвия;

б) уравнение прямой, касательной к контактной площадке передней поверхности и совпадающей с направлением действительного сбег стружки.

Направляющие косинусы вектора истинной скорости резания v_u в точке $M(x_0, y_0, z_0)$, как это следует из фиг. 28, определяются уравнениями:

$$\begin{aligned}\cos \alpha_1 &= \sin \sigma; \\ \cos \beta_1 &= \cos \sigma \sin \varepsilon; \\ \cos \gamma_1 &= \cos \sigma \cos \varepsilon.\end{aligned}$$

Зная направляющие косинусы, можем написать уравнение касательной к винтовой траектории сложного пространственного рабочего движения

$$\frac{x - x_0}{\sin \sigma} = - \frac{y - y_0}{\cos \sigma \sin \varepsilon} = \frac{z - z_0}{\cos \sigma \cos \varepsilon}. \quad (35)$$

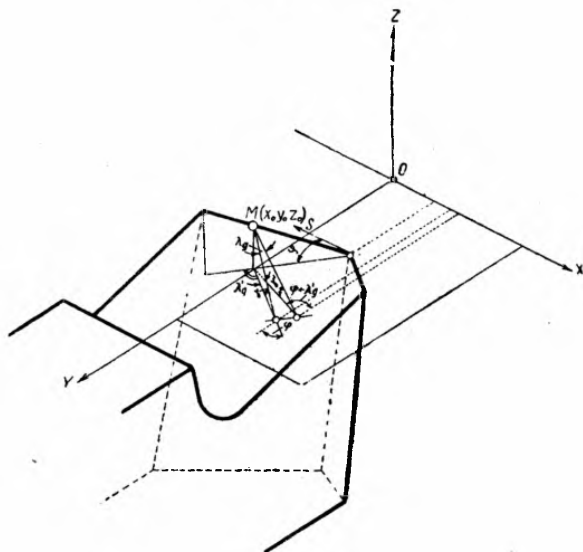
а уравнение плоскости, перпендикулярной к вектору v_u в той же точке $M(x_0, y_0, z_0)$

$$\sin \sigma (x - x_0) + \cos \sigma \sin \varepsilon (y - y_0) + \cos \sigma \cos \varepsilon (z - z_0) = 0. \quad (36)$$

Для вывода уравнения прямой, касательной к контактной площадке передней поверхности и совпадающей с направлением действительного сбега стружки, рассмотрим фиг. 30 и 31.

Наиболее вероятное направление сбега стружки отклоняется от нормали к главному режущему лезвию на угол сбега стружки λ_∂ , измеряемый в плоскости передней поверхности инструмента. Проекция этого угла на плоскость XU определяется уравнением

$$\operatorname{tg} \lambda'_\partial = \frac{\operatorname{tg} \lambda_\partial}{\cos \gamma}. \quad (37)$$



Фиг. 30.

Статический передний угол γ задается всегда в нормальной плоскости N . В направлении действительного сбега стружки передний угол $\gamma' < \gamma$. Согласно фиг. 30 и 31:

$$\left. \begin{aligned} \sin \gamma' &= \sin \gamma \cos \lambda_\partial; \\ \cos \gamma' &= \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial}. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Проекция прямой, совпадающей с направлением действительного сбега стружки по передней поверхности резца на плоскость XU , образует с вектором подачи s угол $\varphi + \lambda'_\partial$. Направляющие косинусы прямой действительного направления сбега стружки, как это следует из фиг. 31, выражаются уравнениями:

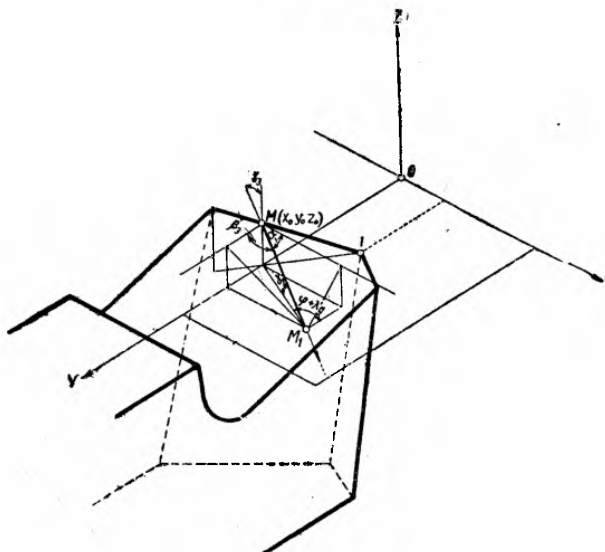
$$\begin{aligned} \cos \alpha_3 &= \sin (\varphi + \lambda'_\partial) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial}; \\ \cos \beta_3 &= \cos (\varphi + \lambda'_\partial) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial}; \\ \cos \gamma_3 &= \sin \gamma \cos \lambda_\partial. \end{aligned}$$

Уравнение этой прямой

$$\frac{x - x_0}{\sin(\varphi + \lambda'_\theta) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\theta}} = \frac{y - y_0}{\cos(\varphi + \lambda'_\theta) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\theta}} = \frac{z - z_0}{\sin \gamma \cos \lambda_\theta}. \quad (39)$$

Из уравнений (36) и (39) следует, что передний угол движения γ_θ на токарных резцах выражается уравнением

$$\sin \gamma_\theta = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\theta} [\sin(\varphi + \lambda'_\theta) \sin \sigma + \cos(\varphi + \lambda'_\theta) \cos \sigma \sin \epsilon] + \sin \gamma \cos \lambda_\theta \cos \sigma \cos \epsilon. \quad (40)$$



Фиг. 31.

Угол α_θ , $\alpha_{заз}$, λ_θ и γ_θ в движении на сверлах

Во всех точках главного режущего лезвия 1—2 вектор номинальной скорости резания v лежит в плоскости, касательной к поверхности вращения сверла; он касателен к цилиндру произвольного радиуса r , уравнения которого

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \omega; \\ y &= r \cos \omega; \\ z &= p. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Первые производные от уравнения (41):

$$\frac{dx}{d\omega} = r \cos \omega;$$

$$\frac{dy}{d\omega} = -r \sin \omega;$$

$$\frac{dz}{d\omega} = 0.$$

Тогда уравнение касательной, на которой лежит вектор v номинальной скорости резания в точке $M(x_0 y_0 z_0)$,

$$\frac{x - x_0}{r \cos \omega} = -\frac{y - y_0}{r \sin \omega}. \quad (42)$$

Уравнения винтовой линии сложной пространственной траектории рабочего движения:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin^* \omega; \\ y &= r \cos \omega; \\ z &= \frac{s \omega}{2\pi} \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Первые производные от уравнения (43):

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{d\omega} &= r \cos \omega; \\ \frac{dy}{d\omega} &= -r \sin \omega; \\ \frac{dz}{d\omega} &= \frac{s}{2\pi} \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Тогда уравнение касательной к винтовой траектории рабочего движения в точки $M(x_0 y_0 z_0)$

$$\frac{x - x_0}{r \cos \omega} = -\frac{y - y_0}{r \sin \omega} = \frac{z - z_0}{\frac{s}{2\pi}}. \quad (45)$$

Общий вид уравнения (14) для определения угла движения α_θ применительно к сверлам:

$$\cos \alpha_\theta = \frac{r \sin^2 \omega + r \cos^2 \omega}{\sqrt{\left(\frac{s}{2\pi}\right)^2 + r^2}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{(2\pi r)^2 + s^2}} = \cos \sigma; \quad (46)$$

$$\alpha_\theta^\circ = \sigma^\circ = \arctg \left(\frac{s}{2\pi r} \right). \quad (47)$$

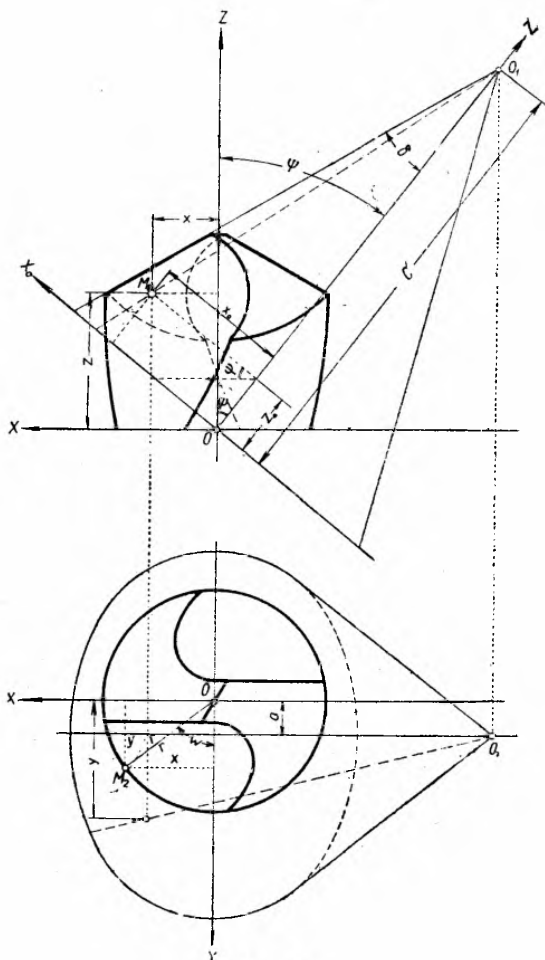
Для определения заднего угла зазора $\alpha_{заз}$ необходимо написать уравнение касательной к следу пересечения задней поверхности сверла цилиндрической поверхностью движения. Пусть задняя поверхность сверла представляет собой конус, ось которого отстоит от оси сверла на расстоянии c мм и перекрещивается с нею под углом ψ (фиг. 32).

Уравнение конуса в подвижной системе координат $X_0 Y_0 Z_0$

$$x_0^2 + (y_0 - a)^2 = (c - z_0)^2 \operatorname{tg}^2 \delta. \quad (48)$$

Выражая координаты подвижной системы через координаты неподвижной системы, получаем:

$$\begin{aligned}x_0 &= x \cos \psi + z \sin \psi; \\y_0 &= y; \\z_0 &= z \cos \psi - x \sin \psi.\end{aligned}$$



Фиг. 32.

Подставив в уравнение (48), получаем уравнение конуса в неподвижной системе координат

$$(x \cos \psi + z \sin \psi)^2 + (y - a)^2 = (c - z \cos \psi + x \sin \psi)^2 \operatorname{tg}^2 \delta. \quad (49)$$

Уравнения цилиндрической поверхности движения:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \omega; \\ y &= r \cos \omega; \\ z &= p. \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

Совместным решением уравнений (49) и (50) находим параметрические уравнения следа пересечения конической задней поверхности сверла с цилиндрической поверхностью движения:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \omega; \\ y &= r \cos \omega; \\ (z \sin \omega \cos \psi + z \sin \psi)^2 + (r \cos \omega - a)^2 - \\ - (c - z \cos \psi + r \sin \omega \sin \psi)^2 \operatorname{tg}^2 \delta &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

Решая уравнение относительно координаты z , имеем

$$z^2 (\sin^2 \psi - \cos^2 \psi \operatorname{tg}^2 \delta) + z (2r \sin \omega \cos \psi \sin \psi + 2c \cos \psi \operatorname{tg}^2 \delta + \\ + 2r \sin \omega \sin \psi \cos \psi \operatorname{tg}^2 \delta) + (r^2 \sin^2 \omega \cos^2 \psi + r^2 \cos^2 \omega + a^2 - c^2 \operatorname{tg}^2 \delta - \\ - 2ar \cos \omega - r^2 \sin^2 \omega \sin^2 \psi \operatorname{tg}^2 \delta - 2cr \sin \omega \sin \psi \operatorname{tg}^2 \delta) = 0.$$

Если обозначить

$$\begin{aligned} A &= \sin^2 \psi - \cos^2 \psi \operatorname{tg}^2 \delta; & F &= 2ar; \\ B &= 2r \sin \psi \cos \psi (1 + \operatorname{tg}^2 \delta); & K &= 2cr \sin \psi \operatorname{tg}^2 \delta; \\ D &= r^2 (\cos^2 \psi - \sin^2 \psi \operatorname{tg}^2 \delta); & P &= a^2 - c^2 \operatorname{tg}^2 \delta; \\ E &= r^2; & T &= 2c \cos \psi \operatorname{tg}^2 \delta, \end{aligned}$$

то уравнение координаты z будет

$$Az^2 + (B \sin \omega + T)z + (D \sin^2 \omega + E \cos^2 \omega - F \cos \omega - K \sin \omega + P) = 0,$$

откуда

$$z = \frac{-(B \sin \omega + T)}{2A} \pm \frac{\sqrt{(B \sin \omega + T)^2 - 4A(D \sin^2 \omega + E \cos^2 \omega - F \cos \omega - K \sin \omega + P)}}{2A}.$$

Тогда уравнения (51) следа пересечения задней поверхности сверла цилиндрической поверхностью движения:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \omega; \\ y &= r \cos \omega; \\ z &= \frac{-(B \sin \omega + T)}{2A} \pm \\ &= \frac{\sqrt{(B \sin \omega + T)^2 - 4A(D \sin^2 \omega + E \cos^2 \omega - F \cos \omega - K \sin \omega + P)}}{2A}. \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

Первые производные от уравнения (52):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\omega} &= r \cos \omega; \\ \frac{dy}{d\omega} &= -r \sin \omega; \end{aligned}$$

$$\frac{d\epsilon}{d\omega} = \frac{2B(B \sin \omega + T) \cos \omega - 4A(2D \sin \omega \cos \omega - 2E \sin \omega \cos \omega + F \sin \omega - K \cos \omega)}{4A \sqrt{(B \sin \omega + T)^2 - 4A(D \sin^2 \omega + E \cos^2 \omega - F \cos \omega - K \sin \omega + P)}} - \frac{B \cos \omega}{2A} = q.$$

Уравнение касательной к следу пересечения задней поверхности сверла цилиндрической поверхностью движения в точке $M(x_0, y_0, z_0)$

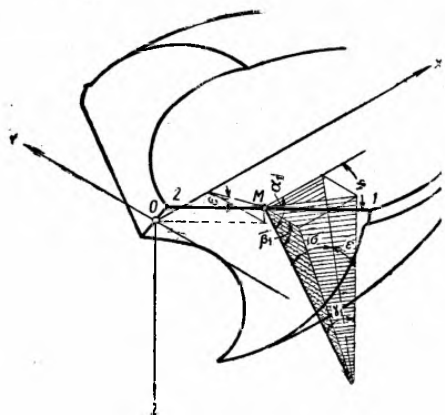
$$\frac{x - x_0}{r \cos \omega} = -\frac{y - y_0}{r \sin \omega} = \frac{z - z_0}{q}. \quad (53)$$

Тогда общий вид уравнения (15) для определения угла заднего зазора $\alpha_{\text{зад}}$

$$\cos \alpha_{\text{зад}} = \frac{r^2 \cos^2 \omega + r^2 \sin^2 \omega + \frac{sq}{2\pi}}{\sqrt{r^2 + q^2} \cdot \sqrt{r^2 + \frac{s^2}{4\pi^2}}} = \frac{r^2 + \frac{sq}{2\pi}}{\sqrt{r^2 + q^2} \cdot \sqrt{r^2 + \frac{s^2}{4\pi^2}}}. \quad (54)$$

Для определения угла сбега стружки λ_0 на сверлах отнесем сверло к пространственным координатным осям XYZ (фиг. 33). Вектор истинной скорости резания v_u в произвольной точке $M(x_0, y_0, z_0)$ главного режущего лезвия 1—2 образует с осью X угол α_1 , с осью Y — угол β_1 и с осью Z — угол γ_1 . Величина этих углов (фиг. 33) выражается равенствами:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \sin \sigma; \\ \cos \beta_1 &= \cos \sigma \sin \epsilon; \\ \cos \gamma_1 &= \cos \sigma \cos \epsilon. \end{aligned}$$



Фиг. 33.

Главное режущее лезвие 1—2 образует с осью X угол α_2 , с осью Y — угол β_2 и с осью Z — угол γ_2 . Величины этих углов (фиг. 33) выражаются равенствами:

$$\begin{aligned} \cos \alpha_2 &= \cos \varphi; \\ \cos \beta_2 &= \sin \varphi; \\ \cos \gamma_2 &= \cos 90^\circ = 0. \end{aligned}$$

Если известны направляющие косинусы вектора истинной скорости резания v_u и главного режущего лезвия 1—2, то уравнение (19) для угла сбега стружки применительно к сверлам примет вид

$$\sin \lambda_0 = \sin \sigma \cos \varphi + \cos \sigma \sin \varphi \sin \epsilon. \quad (55)$$

В уравнении (55) угол ε определяется по уравнению

$$\sin \varepsilon = \frac{b}{2r}, \quad (56)$$

где r — радиус рассматриваемой точки M главного режущего лезвия, а размер b — толщина перемычки у сверла в этой же точке M .

Статический угол возвышения λ на сверлах зависит от положения точки M на главном режущем лезвии и от толщины перемычки b (при прямолинейном режущем лезвии). Математически эта зависимость может быть выражена уравнением

$$\operatorname{tg} \lambda = \operatorname{tg} \varepsilon \sin \varphi. \quad (57)$$

Для определения переднего угла в движении λ_∂ необходимо написать уравнение плоскости, перпендикулярной к вектору истинной скорости резания v_a в точке $M(x_0, y_0, z_0)$.

Направляющие косинусы вектора v_0 в точке $M(x_0, y_0, z_0)$ известны.

Уравнение касательной к винтовой траектории рабочего движения в точке $M(x_0, y_0, z_0)$

$$\frac{x - x_0}{\sin \sigma} = -\frac{y - y_0}{\cos \sigma \sin \varepsilon} = \frac{z - z_0}{\cos \sigma \cos \varepsilon}, \quad (58)$$

а уравнение плоскости, перпендикулярной к вектору v_a , лежащего на этой касательной,

$$\sin \sigma' (x - x_0) + \cos \sigma \sin \varepsilon (y - y_0) + \cos \sigma \cos \varepsilon (z - z_0) = 0. \quad (59)$$

Эта плоскость образует с линией сбег стружки по передней поверхности сверла передний угол в движении γ_∂ .

Линия сбег стружки отклоняется от нормали к главному режущему лезвию 1—2 на угол сбег стружки λ_∂ . Проекция этого угла на плоскость XU (фиг. 30) определяется уравнением (37)

$$\operatorname{tg} \lambda'_\partial = \frac{\operatorname{tg} \lambda_\partial}{\cos \gamma}.$$

Передний угол в направлении линии сбег стружки находится в зависимости от статического переднего угла в нормальной плоскости согласно уравнению (38):

$$\left. \begin{aligned} \sin \gamma' &= \sin \gamma \cos \lambda_\partial; \\ \cos \gamma' &= \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial}. \end{aligned} \right\}$$

Проекция линии действительного сбег стружки по передней поверхности сверла на плоскость XU (или параллельную ей) образует с вектором подачи угол $90^\circ - \varphi - \lambda'_\partial$. Направляющие косинусы, образуемые линией сбег стружки (фиг. 34), выражаются уравнениями:

$$\cos \alpha_3 = \sin (\varphi + \lambda'_\partial) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial};$$

$$\cos \beta_3 = \cos (\varphi + \lambda'_\partial) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial};$$

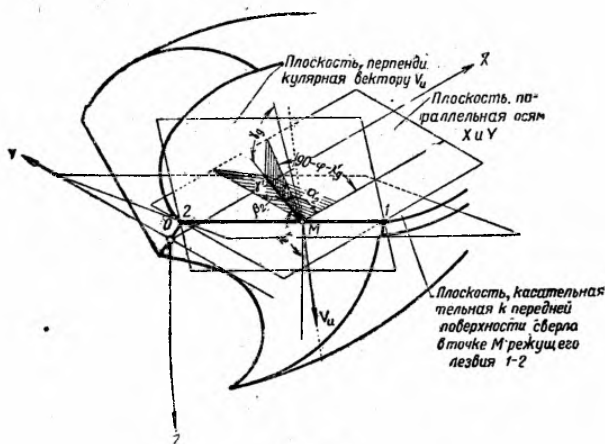
$$\cos \gamma_3 = \sin \gamma \cos \lambda_\partial$$

и уравнение самой линии сбегу стружки

$$\frac{x - x_0}{\sin(\varphi + \lambda'_\partial) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial}} = \frac{y_0 - y}{\cos(\varphi + \lambda'_\partial) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial}} = \frac{z - z_0}{\sin \gamma \cos \lambda_\partial} \quad (60)$$

Из уравнений (59) и (60) следует, что передний угол γ_∂ движения на сверлах может быть выражен уравнением, аналогичным таковому для токарного резца,

$$\sin \gamma_\partial = (\sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial}) [\sin(\varphi + \lambda'_\partial) \sin \varepsilon + \cos(\varphi + \lambda'_\partial) \cos \sigma \sin \varepsilon] + \sin \gamma \cos \lambda_\partial \cos \sigma \cos \varepsilon. \quad (61)$$



Фиг. 34.

Углы α_0 , α_{03} , λ_0 и γ_0 в движении на метчиках

Метчики, так же как и сверла, траекторией своего относительного рабочего движения имеют винтовую линию. В силу этого уравнение касательной, на которой лежит вектор v номинальной скорости резания в точке $M(x_0, y_0, z_0)$ главного режущего лезвия 1-2,

$$\frac{x - x_0}{r \cos \omega} = \frac{y - y_0}{r \sin \omega}, \quad (62)$$

а уравнение касательной к винтовой траектории рабочего движения, на которой лежит вектор v_n истинной скорости реза-

Общий вид уравнения (14) для определения угла движения α_0 применительно к метчикам будет

$$\cos \alpha_0 = \frac{r \sin^2 \omega + r \cos^2 \omega}{\sqrt{\left(\frac{s}{2\pi}\right)^2 + r^2}} = \frac{2\pi r}{\sqrt{(2\pi r)^2 + s^2}} = \cos \gamma, \quad (64)$$

откуда

$$\alpha_0^0 = \gamma^0.$$

Задняя поверхность на метчиках может быть технологически выполнена по-разному в зависимости от принципа действия применяемого затыловочного приспособления. Наиболее оправданным и обоснованным является принцип действия затыловочного приспособления, основанный на том, что шлифовальному кругу сообщается относительное винтовое перемещение, в результате чего на метчиках образуются задние винтовые поверхности с шагом T . След пересечения задней поверхности на подобном приспособлении затылованного метчика с цилиндрической поверхностью движения радиуса r есть винтовая линия радиуса r и шага T . Уравнения этого следа:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \omega; \\ y &= r \cos \omega; \\ z &= \frac{T \omega}{2\pi}. \end{aligned} \right\} \quad (65)$$

Первые производные:

$$\frac{dx}{d\omega} = r \cos \omega;$$

$$\frac{dy}{d\omega} = -r \sin \omega;$$

$$\frac{dz}{d\omega} = \frac{T}{2\pi}.$$

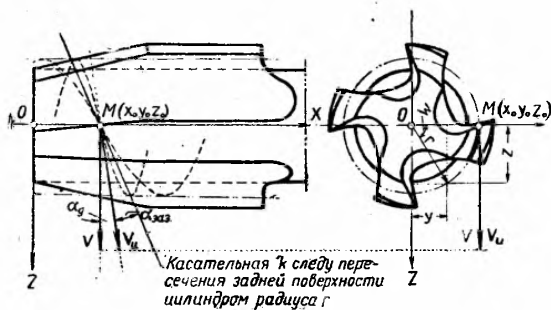
Уравнение касательной к винтовому следу пересечения задней поверхности метчика цилиндрической поверхностью движения в точке $M(x_0, y_0, z_0)$

$$\frac{x - x_0}{r \cos \omega} = -\frac{y - y_0}{r \sin \omega} = \frac{z - z_0}{\frac{T}{2\pi}}. \quad (66)$$

Общий вид уравнения (15) для определения заднего угла зазора $\alpha_{заз}$ применительно к метчикам

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{заз} &= \frac{r^2 \cos^2 \omega + r^2 \sin^2 \omega + \frac{sT}{4\pi^2}}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2} \sqrt{r^2 + \left(\frac{s}{2\pi}\right)^2}} = \\ &= \frac{(2\pi r)^2 + sT}{\sqrt{(2\pi r)^2 + s^2} \sqrt{(2\pi r)^2 + T^2}} \end{aligned} \quad (67)$$

Все изложенное иллюстрировано схемой на фиг. 35. Здесь уместно указать, что уравнения (66) и (67) справедливы не только для метчиков, но также и для целого ряда других



Фиг. 35.

инструментов с винтовым рабочим движением и винтовым за-
тылованием задней поверхности, например, круглых плашек,
сверл и т. п.

Для определения угла сбега стружки λ_θ отнесем метчик к пространственным координатным осям (фиг. 36). Направляющие косинусы вектора v_u истинной скорости резания в точке M режущего лезвия, как это видно из расчетной схемы:

$$\cos \alpha_1 = \sin \sigma;$$

$$\cos \beta_1 = \cos \sigma \sin \varepsilon;$$

$$\cos \gamma_1 = \cos \sigma \cos \varepsilon.$$

Направляющие косинусы линии 1—2 главного режущего лезвия, на котором лежит точка M :

$$\cos \alpha_2 = \cos \lambda \cos \varphi;$$

$$\cos \beta_2 = \cos \lambda \sin \varphi;$$

$$\cos \gamma_2 = \sin \lambda.$$

Общий вид уравнения (10) для угла сбега стружки λ_θ применительно к метчикам

$$\sin \lambda_\theta = \sin \sigma \cos \lambda \cos \varphi + \cos \sigma \cos \lambda \sin \varphi \sin \varepsilon + \cos \sigma \sin \lambda \cos \varepsilon. \quad (68)$$

Угол ε , определяющий положение рассматриваемой точки $M(x_0, y_0, z_0)$ относительно центра метчика, выражается уравнением

$$\sin \varepsilon = \frac{B \cos \varphi - 2(l_p - x_0) \operatorname{tg} \lambda}{D \cos \varphi - 2(l_p - x_0) \sin \varphi} \quad (69)$$

Для определения переднего угла в движении γ_∂ рассмотрим фиг. 37.

Уравнение касательной к винтовой траектории рабочего движения, на которой лежит вектор v_a , приложенный к режущему лезвию в точке $M(x_0, y_0, z_0)$,

$$\frac{x - x_0}{\sin \sigma} = - \frac{y - y_0}{\cos \sigma \sin \varepsilon} = \frac{z - z_0}{\cos \sigma \cos \varepsilon}, \quad (70)$$

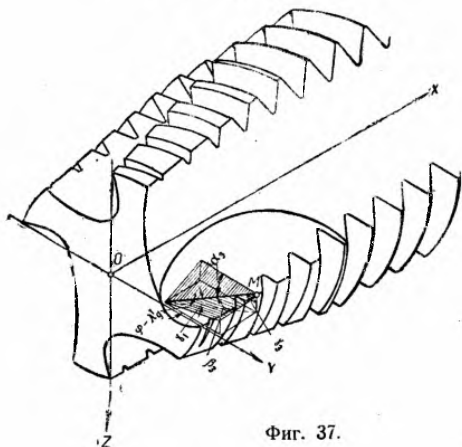
а уравнение плоскости, перпендикулярной к вектору, лежащему на этой касательной,

$$(x - x_0) \sin \sigma + (y - y_0) \cos \sigma \sin \varepsilon + (z - z_0) \cos \sigma \cos \varepsilon = 0. \quad (71)$$

Угол, образованный этой плоскостью с линией сбега стружки по передней поверхности метчика, является передним углом в движении γ_∂

Проекция угла сбега стружки на плоскость XU определяется уравнением (37)

$$\operatorname{tg} \lambda'_\partial = \frac{\operatorname{tg} \lambda_\partial}{\cos \gamma}.$$



Фиг. 37.

Передний угол γ' в направлении линии сбега стружки определяется уравнениями (38):

$$\sin \gamma' = \sin \gamma \cos \lambda_\partial;$$

$$\cos \gamma' = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial}.$$

Проекция на плоскость XU линии действительного сбега стружки по передней поверхности метчика образует с вектором подачи s угол $90^\circ - (\varphi - \lambda'_\partial)$.

Направляющие косинусы линии сбега стружки (фиг. 37) выражаются уравнениями:

$$\cos \alpha_s = \sin (\varphi - \lambda'_\partial) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_\partial};$$

$$\cos \beta_3 = \cos (\varphi - \lambda'_0) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_0};$$

$$\cos \gamma_3 = \sin \gamma \cos \lambda_0.$$

Тогда уравнение линии сбега стружки на метчиках

$$\frac{x - x_0}{\sin (\varphi - \lambda'_0) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_0}} = \frac{y - y_0}{\cos (\varphi - \lambda'_0) \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_0}} = \frac{z - z_0}{\sin \gamma \cos \lambda_0}. \quad (72)$$

Передний угол в движении γ_0 на метчиках принимает вид

$$\sin \gamma_0 = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \cos^2 \lambda_0} [\sin (\varphi - \lambda'_0) \sin \sigma + \cos (\varphi - \lambda'_0) \cos \sigma \sin \epsilon] + \sin \gamma \cos \lambda_0 \cos \sigma \cos \epsilon. \quad (73)$$

Сопоставляя уравнения (40) и (61), выражающие величину переднего угла в движении γ_0 на токарных резцах и сверлах, и уравнение (73), выражающее тот же угол на метчиках, замечаем, что они отличаются лишь знаком угла λ'_0 . Это определяет стремления отклонить стружку при точении и сверлении в сторону, противоположную действую вектора подачи s , а при нарезании резьбы метчиками, наоборот, в сторону подачи, что практически достигается заточкой на инструментах надлежащих по знаку и величине статических углов возвышения λ .

Углы в движении α_0 , $\alpha_{заз}$, λ_0 и γ_0 на цилиндрических фрезах

Каждая точка режущего лезвия цилиндрической фрезы совершает в процессе работы плоскостное рабочее движение по удлиненной циклоиде, называемой трахоидой. Параметрическое уравнение трахоиды:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{Zs_z}{2\pi} \omega - \frac{D}{2} \sin \omega; \\ y &= \frac{Zs_z}{2\pi} - \frac{D}{2} \cos \omega, \end{aligned} \right\} \quad (74)$$

где Z — число зубьев фрезы; s_z — подача на один зуб; D — диаметр фрезы.

Тангенс угла наклона касательной к трахоиде

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{d\omega}}{\frac{dx}{d\omega}} = \frac{\frac{D}{2} \sin \omega}{\frac{Zs_z}{2\pi} - \frac{D}{2} \cos \omega} = \frac{\sin \omega}{\frac{Zs_z}{\pi D} - \cos \omega}. \quad (75)$$

Уравнение касательной к трахоиде в точке $M(x_0 y_0)$ режущего лезвия (фиг. 38)

$$y = y_0 - \left(\frac{\sin \omega}{\frac{Zs_z}{\pi D} - \cos \omega} \right) (x - x_0).$$

Но так как

$$\sin \omega = \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{p^2}{D^2}};$$

$$\cos \omega = 1 - \frac{2t}{D},$$

$$y = y_0 - \left(\frac{\sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}}}{\frac{Zs_z}{\pi D} - 1 + \frac{2t}{D}} \right) (x - x_0);$$

$$y = y_0 - \left(\frac{2\sqrt{tD - t^2}}{\frac{Zs_z}{\pi} - D + 2t} \right) (x - x_0). \quad (76)$$

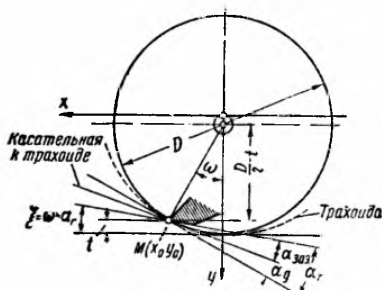
Касательная к наружной окружности фрезы составляет с осью X угол

$$\omega = \arccos \left(1 - \frac{2t}{D} \right). \quad (77)$$

Уравнение касательной к окружности фрезы, на которой лежит вектор v номинальной скорости резания в точке $M(x_0 y_0)$ режущего лезвия,

$$y = y_0 - \operatorname{tg} \omega (x - x_0). \quad (78)$$

Имея уравнения (76) и (78) касательных к окружности фрезы и к трахоиде в одной и той же точке $M(x_0 y_0)$, можно определить величину угла движения α_∂



Фиг. 38.

$$\alpha_\partial^0 = \omega^0 - \operatorname{arctg} \left(\frac{2\sqrt{tD - t^2}}{\frac{Zs_z}{\pi} - D + 2t} \right)$$

или

$$\alpha_\partial^0 = \arccos \left(1 - \frac{2t}{D} \right) - \operatorname{arctg} \left[\frac{2\sqrt{tD - t^2}}{\frac{Zs_z}{\pi} - D + 2t} \right]. \quad (79)$$

Полагая, что задняя поверхность зуба фрезы в торцевом сечении очерчена по прямой, образующей с касательной к окружности фрезы торцевой задний угол $\alpha_{\text{зад}}$, определяем уравнение ее на основании фиг. 38

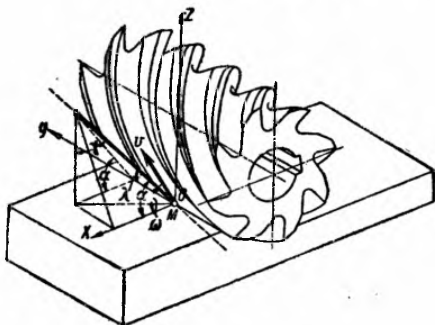
$$y = y_0 - \operatorname{tg} (\omega - \alpha_r) (x - x_0). \quad (80)$$

Из уравнений (76) и (80) следует, что задний угол зазора $\alpha_{\text{зад}}$ на цилиндрических фрезах может быть выражен уравнением

$$\cos \alpha_{\text{зад}} = \frac{\operatorname{tg}(\omega - \alpha_r) - \frac{2\sqrt{tD - t^2}}{Zs_z - D + 2t}}{1 - \operatorname{tg}(\omega - \alpha_r) \frac{2\sqrt{tD - t^2}}{Zs_z - D + 2t}} \quad (81)$$

Для определения угла сбега стружки λ_θ относим цилиндрическую фрезу с винтовым зубом к пространственным координатным осям XYZ (фиг. 39). Направляющие косинусы касательной к винтовому режущему лезвию в точке M равны

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \sin \lambda \cos \omega = \left(1 - \frac{2t}{D}\right) \sin \lambda; \\ \cos \beta_1 &= \cos \lambda; \\ \cos \gamma_1 &= \sin \lambda \sin \omega = \left(2\sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}}\right) \sin \lambda. \end{aligned} \right\} \quad (82)$$



Фиг. 39.

Зная уравнение (75), найдем направляющие косинусы вектора истинной скорости резания v_u в той же точке M , которые равны:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_2 &= \frac{Zs_z - \pi D \cos \omega}{\sqrt{Z^2 s_z^2 + \pi^2 D^2 - 2\pi D Z s_z \cos \omega}}; \\ \cos \beta_2 &= \cos 90^\circ = 0; \\ \cos \gamma_2 &= \frac{\pi \cdot D \sin \omega}{\sqrt{Z^2 s_z^2 + \pi^2 D^2 - 2\pi D Z s_z \cos \omega}}. \end{aligned} \right\} \quad (83)$$

Подставив в уравнение (19) найденные из уравнений (82) и (83) значения направляющих косинусов, получаем для цилиндрической фрезы

$$\sin \lambda_\theta = \frac{\sin \lambda}{\sqrt{Z^2 s_z^2 + \pi^2 D^2 - 2\pi D Z s_z \cos \omega}} \left[\left(1 - \frac{2t}{D}\right) (Zs_z - \pi D \cos \omega) + 2\pi D \sin \omega \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}} \right] \quad (84)$$

Уравнение (84) может быть значительно упрощено, если в уравнении (84), вследствие малой величины, допустить, что

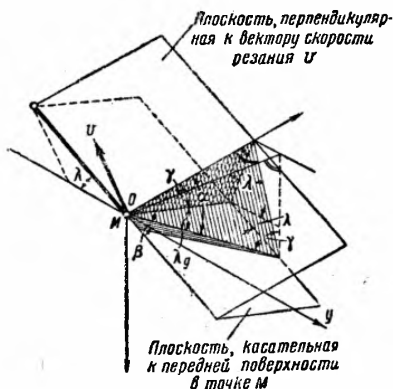
$$\frac{Zs_z}{\pi D} = 0.$$

Это допущение означает, что плоскостное рабочее движение по трахоиде заменяется окружностью радиуса $\frac{D}{2}$, и истинная скорость резания v_u заменяется номинальной скоростью резания v , касательной к окружности фрезы. Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{\sin \omega}{\cos \omega} = \operatorname{tg} \omega.$$

Направляющие косинусы вектора номинальной скорости резания:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_3 &= 1 - \frac{2t}{D} = \cos \omega; \\ \cos \beta_3 &= 0; \\ \cos \gamma_3 &= 2 \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}} = \sin \omega. \end{aligned} \right\} \quad (85)$$



Фиг. 40.

Подставив в уравнение (19) найденные по уравнениям (82) и (85) значения направляющих косинусов, получим

$$\begin{aligned} \sin \lambda_0 &= \sin \lambda \cos^2 \omega + \\ &+ \sin \lambda \sin^2 \omega = \sin \lambda, \end{aligned}$$

откуда следует, что

$$\lambda_0 = \lambda,$$

т. е. направление сбега стружки весьма близко к радиальному и отклоняется от нормали к режущему лезвию на угол $\lambda_0 \approx \lambda$, т. е. углу наклона винтового зуба фрезы.

Передний угол в движении γ_0 на фрезах образован плоскостью, перпендикулярной к трахоиде в точке $M(x_0, y_0)$ и линией сбега стружки по передней поверхности зуба фрезы.

Уравнение плоскости, перпендикулярной в точке $M(x_0, y_0)$ к трахоиде,

$$\frac{Zs_z - \pi D \cos \omega}{Zs_z - \pi D} (x - x_0) + \frac{\pi D \sin \omega}{Zs_z - \pi D} (z - z_0) = 0. \quad (86)$$

Направляющие косинусы линии сбега стружки MM_1 (фиг. 40) равны:

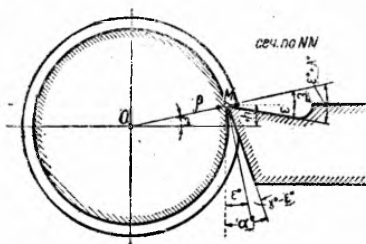
$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_4 &= \cos \lambda_0 \cos \gamma; \\ \cos \beta_4 &= \sin \lambda_0 \cos \lambda - \cos \lambda_0 \sin \gamma \sin \lambda; \\ \cos \gamma_4 &= \sin \lambda_0 \sin \lambda + \cos \lambda_0 \sin \gamma \cos \lambda. \end{aligned} \right\} \quad (87)$$

Подставив найденные из уравнений (86) и (87) направляющие косинусы в общий вид уравнения (20), получим для цилиндрических фрез

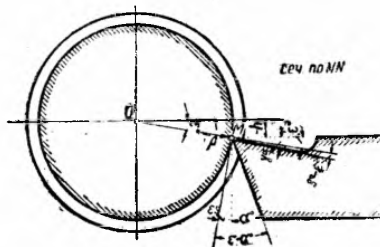
$$\sin \gamma_0 = \frac{(Zs_z - \pi D \cos \omega) \cos \lambda \cos \gamma + \pi D \sin \omega (\sin \lambda_0 \sin \lambda + \cos \lambda_0 \sin \gamma \cos \lambda)}{\sqrt{Z^2 s_z^2 - 2\pi D Z s_z \cos \omega + \pi^2 D^2}} \quad (88)$$

§ 12. ПОСЛЕДСТВИЯ УСТАНОВКИ ТОКАРНЫХ РЕЗЦОВ ВЫШЕ ИЛИ НИЖЕ ОСИ ВРАЩЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ

По теории резания металлов установка токарных резцов при наружной обточке выше оси вращения изделия приводит к уменьшению задних и к увеличению передних углов, а установка ниже оси, наоборот, — к увеличению задних и к уменьшению передних углов.



Фиг. 41.



Фиг. 42.

Прилагая к указанным условиям установки резцов относительно оси вращения изделия стандартные (по ОСТ) определения задних и передних углов, получаем следующие зависимости (фиг. 41 и 42):

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{h>0} &= \alpha_{h=0} - \arcsin \left(\frac{h}{\rho} \right); \\ \alpha_{h<0} &= \alpha_{h=0} + \arcsin \left(\frac{h}{\rho} \right); \end{aligned} \right\} \quad (89)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{h>0} &= \gamma_{h=0} + \arcsin \left(\frac{h}{\rho} \right); \\ \gamma_{h<0} &= \gamma_{h=0} - \arcsin \left(\frac{h}{\rho} \right); \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

позволяющие вычислить абсолютные величины задних и передних углов в зависимости от знака и величины смещения $\pm h$ мм относительно оси вращения изделия.

Уравнение (30), выражающее величину заднего угла зазора $\alpha_{заз}$ в состоянии рабочего движения токарного резца, так же как и уравнение (89), позволяет вычислить, но только с большей точностью, действительную величину заднего угла при любых смещениях $\pm h$ мм.

Результаты вычисления величины заднего угла по уравнению (89) и угла $\alpha_{\text{заз}}$ по уравнению (30) при разных значениях $\pm h$ мм и при $\rho=50$ мм, $s=1$ мм/об, $\varphi=45^\circ$, $\alpha=7^\circ$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Величина смещения h	-8	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6
По уравнению (30) $\alpha_{\text{заз}}$	18°37'	16°25'	14°18'	12°11'	9°59'	7°44'	5°28'	3°11'
По уравнению (89) $\alpha = 7^\circ \mp \arcsin \frac{h}{\rho}$	16°12'	13°53'	11°35'	9°18'	7°00'	4°42'	2°25'	0°07'
Разница $\frac{\alpha_{\text{заз}}}{7^\circ \mp \arcsin \frac{h}{\rho}}$ в %	115	118	123	131	143	165	226	2730

Из сопоставления приведенных в табл. 3 цифровых величин видно, что при всех смещениях $\pm h$ мм действительный задний угол зазора $\alpha_{\text{заз}}$ всегда больше заднего угла, вычисленного по уравнению (89).

Наибольшая разница обнаруживается при установке резца выше оси вращения изделия.

При установке резца ниже оси эта разница уменьшается и вычисленные по уравнениям (89) и (30) цифровые величины сближаются.

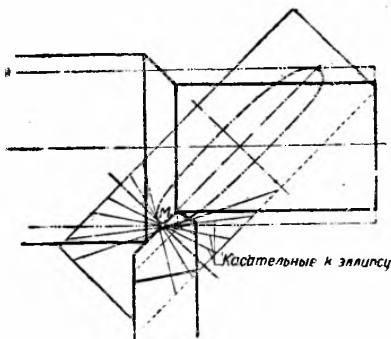
Из этого следует, что ошибки, допускаемые при пользовании уравнением (89), неодинаковые по величине, и поэтому вполне закономерно, что основанные на этом уравнении предположения о последствиях практического порядка будут соответственно величине допущенной ошибки расходиться с результатами наблюдения за работой резцов в лабораторно-экспериментальной и производственной обстановке.

Так, например, из уравнения (89) следует, что при установке резца, имеющего статический задний угол заточки $\alpha=7^\circ$, выше оси вращения изделия радиуса $\rho=50$ мм на величину $+h=6$ мм задний угол равен лишь $+0^\circ07'$, т. е. практически равен нулю и исключает свободное перемещение резца по сложной пространственной траектории относительного рабочего движения. Однако в действительности, как это следует из уравнения (30), задний угол зазора $\alpha_{\text{заз}}=3^\circ11'$ и свободное перемещение резца по его сложной пространственной траектории рабочего движения еще вполне возможно.

Приведенные в табл. 3 цифровые величины заднего угла $\alpha_{\text{заз}}$ позволяют устранить еще одно ошибочное и общеупотребительное в теории резания металлов представление, заключающееся в том, что в процессе работы заточенный на токарном резце статический задний угол уменьшается на величину угла подъема σ винтовой траектории рабочего движения.

Это представление, основанное на логическом рассуждении, совершенно правильно. В процессе резания угол движения, выраженный для токарного резца уравнением (25), в действительности равен углу подъема σ винтовой траектории рабочего движения резца и на величину этого угла действительно уменьшается угол зазора $\alpha_{\text{ззз}}$. Если выключить механизм подачи s , сохранив только вращение изделия, то винтовая траектория относительного рабочего движения перейдет в движение по окружности постоянного радиуса, а угол зазора $\alpha_{\text{ззз}}$ увеличится при всех значениях $\pm h$ мм ровно на величину угла σ по сравнению с цифровыми величинами, приведенными в табл. 3. Но и без этого содержащиеся в табл. 3 углы $\alpha_{\text{ззз}}$ при $h=0 \pm 2$ мм больше статического угла заточки $\alpha_{\text{ззз}}=7^\circ$, а не меньше, как это следовало бы ожидать, исходя из принятых в теории резания металлов представлений. Очевидно, эти представления ошибочны и причины этой ошибочности, так же как и расхождения результатов вычисления по уравнениям (89) и (30), заключаются:

1) в полной условности изображения поверхности резания на схемах (фиг. 41 и 42); построение этих схем основано на допущении, что след сечения поверхности резания главной секущей плоскостью есть



Фиг. 43.

окружность радиуса $r = \frac{D}{2} - t$ мм, тогда как в действительности поверхность резания ни в одном сечении плоскостью не дает кругового следа;

2) в том, что измерение стандартных углов производится в главной секущей плоскости, тогда как в действительности относительное перемещение поверхности резания и задней поверхности резца происходит не в главной секущей плоскости, а в поверхности движения, являющейся в случае точения цилиндром радиуса r . Задняя поверхность резца, как правило, является плоскостью. След сечения этой плоскостью цилиндрической поверхности движения всегда есть эллипс, касательная к которому в точке M режущего лезвия лежит в плоскости задней грани резца и согласно определению, данному в § 6, ограничивает со стороны инструмента задний угол зазора $\alpha_{\text{ззз}}$. С установкой точки M режущего лезвия выше или ниже оси вращения изделия на $\pm h$ мм касательная к эллипсу (фиг. 43) резко меняет свой наклон и при этом всегда способствует увеличению заднего угла зазора $\alpha_{\text{ззз}}$, что и отражается на приведенных в табл. 3 результатах вычисления по уравнению (30).

В этом и заключается ошибочность некоторых общеупотребительных в теории резания металлов представлений об изменении задних углов на токарных резцах при их установке на $\pm h$ мм выше или ниже оси вращения обрабатываемого изделия.

В некоторой связи с изложенными причинами расхождения результатов вычисления по уравнениям (89) и (30) находится также и зависимость абсолютной величины $\alpha_{заз}$ от величины угла в плане φ .

Вычисленные по уравнению (30) числовые величины угла $\alpha_{заз}$ при наиболее употребительных значениях угла φ приведены в табл. 4, из которой видно, что при $\rho=50$ мм, $s=1$ мм/об и $h=0$ величина угла φ оказывает весьма сильное влияние на абсолютную величину угла $\alpha_{заз}$ и, следовательно, на условия свободного перемещения задней поверхности резца относительно поверхности резания на изделии.

Таблица 4

Угол в плане φ°	30°	45°	60°	90°
По уравнению $\alpha_{заз}$	13°53'	9°59'	8°11'	7°00'
Статический задний угол α° заточки	7°00'	7°00'	7°00'	7°00'
Разница $\frac{\alpha_{заз}}{\alpha} \cdot 100$ в %	198	143	117	100

Приведенные в табл. 4 цифры с наглядной убедительностью показывают, что пренебрегать влиянием угла φ в плане на величину заднего угла $\alpha_{заз}$ недопустимо не только при экспериментально-лабораторных исследованиях, но также и при выборе режимов резания в цеховых условиях. Это подтверждается также опытами канд. техн. наук, доц. Е. К. Зверева, проведенными им с целью установления оптимальных величин задних углов заточки на токарных резцах. Результаты этих опытов показали, что для проходных резцов с углом в плане $\varphi=45^\circ$ оптимальный задний угол заточки $\alpha=4^\circ$, тогда как для резцов подрезного типа с углом в плане $\varphi=90^\circ$ оптимальный задний угол заточки $\alpha \approx 6^\circ$. Прилагая к обоим случаям уравнение (30), находим, что в обоих случаях действительный задний угол зазора $\alpha_{заз}=6^\circ$, что, видимо, является оптимальным значением для токарных резцов.

На фиг. 24 и 25 было показано, что направление сбег и отклонение стружки дает при установке токарного резца со статическим углом возвышения $\lambda=0$ выше и ниже оси вращения изделия на $\pm h$ мм такой же эффект, как при наличии на резце угла возвышения $\lambda \geq 0^\circ$.

Математически эта зависимость выражена уравнением (31). Результаты вычисления по этому уравнению при разных смещениях $\pm h$ мм и $\lambda=0$, а также при $\rho=50$ мм, $s=1$ мм/об, $\varphi=45^\circ$ приведены в табл. 5.

Таблица 5

Величина смещения h в мм	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6
Угол сбега стружки λ_θ	+5°00'	+3°22'	+1°45'	+0°08'	-1°30'	-3°07'	-4°44'

Из табл. 5 видно, что при установке выше оси изделия угол λ_θ имеет отрицательный знак, указывающий на то, что достигнутый таким смещением эффект равноценен наличию на резце отрицательного угла возвышения $\lambda < 0^\circ$, тогда как при установке ниже оси изделия абсолютная величина угла λ_θ несколько больше, чем при установке над осью, и имеет положительный знак, указывающий на то, что эффект, достигнутый этим смещением, равноценен наличию на токарном резце угла положительного возвышения $\lambda > 0^\circ$.

Для выяснения, в какой мере статический угол возвышения $\lambda \geq 0$ влияет на величину и знак угла сбега стружки λ_θ , в табл. 6 приведены вычисленные по уравнению (31) числовые значения λ_θ при установке токарного резца на высоте оси вращения изделия, т. е. при $h=0$, $\rho=50$ мм, $s=1$ мм/об, $\varphi=45^\circ$ и $h=0$.

Таблица 6

Статический угол возвышения λ	-6°	-3°	0°	+3°	+6°
Угол сбега стружки λ_θ	-5°52'	-2°52'	+0°08'	+3°08'	+6°08'

Из табл. 6 видно, что углы λ_θ и λ практически равны между собой и при всех значениях $\lambda \geq 0$ разнятся на величину угла λ_θ при $\lambda=0$.

Установка резца со статическим углом возвышения $\lambda \geq 0$ выше или ниже оси вращения изделия приводит к эффекту, определяемому суммарным действием наличных величин и знаков угла λ и смещения h . В силу этого знак и величина угла сбега стружки λ_θ , вычисленные по уравнению (31), при $\rho=50$ мм, $s=1$ мм/об, $\varphi=45^\circ$, определяются не величиной и знаком λ и h , а их суммарным действием (табл. 7) согласно уравнению (31).

Все изложенное об угле сбега стружки λ_θ находится в некотором противоречии с точкой зрения, которой уже несколько десятилетий придерживаются в теории резания металлов:

- стружка сбегаеет по нормали к режущему лезвию;
- при положительном угле возвышения $+\lambda > 0$ стружка отклоняется в правую сторону от токаря, а при отрицательном угле возвышения $-\lambda < 0$ по левую сторону от токаря.

Таблица 7

Статический угол возвышения λ	-5°	$+2^\circ$	-4°	-3°	$+5^\circ$	$+5^\circ$
Смещение отно- сительно оси изде- лия h в мм	$+5$	-6	$+6$	$+10$	-3	$+3$
Угол сбегаструж- ки λ_∂	$-10^\circ 37'$	$+6^\circ 59'$	$-8^\circ 45'$	$-10^\circ 57'$	$+7^\circ 32'$	$+2^\circ 41'$

Эта точка зрения не совсем точно и правильно выражает положение, а в некоторых частных комбинациях аргументов, входящих в уравнение (31), как раз противоречит тому, что имеет место в действительности.

Передний угол в движении γ_∂ находится в зависимости от ряда аргументов, выраженных в уравнении (40), в числе которых имеются статический угол возвышения $\lambda \geq 0$ и величина смещения $\pm h$ мм.

Результаты вычисления переднего угла в движения γ_∂ по уравнению (40) при разных смещениях $\pm h$ мм и при $\lambda = 0$ приведены в табл. 8, а при разных углах $\lambda \geq 0^\circ$, но при смещении $h = 0$ и при $\rho = 50$ мм, $s = 1$ мм/об, $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 10^\circ$ и $h = 0$ в табл. 9.

Таблица 8

Смещение относительно оси вращения изделия h в мм	-6	-4	-2	0	$+2$	$+4$	$+6$
Угол в движении по урав- нению γ_∂	$4^\circ 46'$	$6^\circ 40'$	$8^\circ 27'$	$10^\circ 08'$	$11^\circ 47'$	$13^\circ 31'$	$15^\circ 18'$
Статический угол по урав- нению γ	$3^\circ 06'$	$5^\circ 25'$	$7^\circ 42'$	$10^\circ 00'$	$12^\circ 18'$	$14^\circ 35'$	$16^\circ 54'$
Разница $\gamma_\partial - \gamma$	$1^\circ 40'$	$1^\circ 15'$	$0^\circ 45'$	$0^\circ 08'$	$0^\circ 31'$	$1^\circ 04'$	$1^\circ 36'$

Из табл. 8 видно, что передние углы γ_∂ в движении при установке резца выше оси вращения изделия увеличиваются, а при установке резца ниже ее — уменьшаются. Однако эти изменения при всех отрицательных значениях h мм, в противоположность задним углам зазора $\alpha_{заз}$, вычисленным по уравнению (30) при $\rho = 50$ мм, $s = 1$ мм/об, $\varphi = 45^\circ$, $\lambda = 0^\circ$ и $\gamma = 10^\circ$, меньше, чем вычисленные по уравнению (90), а при $+h$ наоборот, так же и $\alpha_{заз}$, больше, чем вычисленные по уравнению (90), причем наблюдающаяся разница увеличивается с ростом абсолютных величин смещения $\pm h$ мм.

Из табл. 9 видно, что изменение статического угла возвышения λ в пределах ± 6 и при $\rho = 50$ мм, $s = 1$ мм/об, $\gamma = 10^\circ$, $h = 0$, $\varphi = 45^\circ$ влечет за собой столь ничтожные изменения перед-

Таблица 9

Статический угол возвышения λ	+6°	+3	0°	-3°	-6°
Передний угол в движении γ_∂	+10°06'	+10°07'	+10°08'	+10°07'	+10°04'

него угла в движении γ_∂ , что они лишены практического значения, и можно принять, что γ_∂ от λ в указанных пределах не зависит. Это в равной мере относится и к влиянию угла в плане φ на угол γ_∂ , что наглядно видно из табл. 10.

Таблица 10

Угол в плане φ	30°	45°	60°	90°
Передний угол в движении γ_∂	10°05'	10°08'	10°09'	10°10'

Таким образом, уравнения (89) и (90), в математической форме выражающие приложение стандартных определений углов на резцах к фундаментальным положениям теории резания металлов, дают правильное представление об изменениях передних и задних углов на токарных резцах в зависимости от их установки выше или ниже оси вращения изделия лишь в разрезе общей закономерности возрастания или убывания α и γ , не давая в то же время правильных абсолютных величин этих углов в зависимости от той или иной величины смещения $\pm h$ мм.

Правильные абсолютные величины действительных задних углов зазора $\alpha_{\text{зад}}$ можно вычислить по уравнению (30), а наиболее близкие к истине абсолютные передние углы в движении γ_∂ — по уравнению (40).

Наравне с изменениями передних и задних углов всякое смещение точек режущего лезвия токарного резца выше или ниже оси вращения изделия неизбежно приводит к соответствующему увеличению площади номинального сечения стружки F мм² независимо от того, произошло ли это смещение вследствие преднамеренной установки резца выше или ниже этой оси на $\pm h$ мм или же вследствие наличия на нем угла возвышения $\lambda \geq 0^\circ$.

В наиболее непосредственно выраженной форме влияние угла $\lambda \leq 0^\circ$ проявляется на строгальных резцах (фиг. 44). Рассматривая процесс строгания как процесс точения изделия бесконечно большого радиуса, имеем, что при любых условиях строгальный резец установлен на высоте бесконечно удаленной оси вращения и поэтому всегда $\pm h = 0$. Тогда единственным фактором, изменяющим величину сечения стружки F , остается угол возвышения $\lambda \neq 0^\circ$.

Из фиг. 44 следует, что

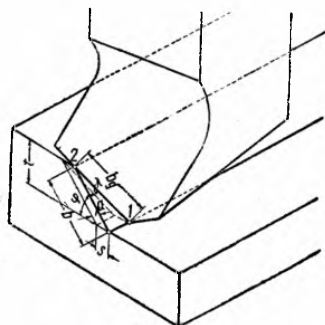
$$a = s \sin \varphi \text{ и } b_0 = \frac{t}{\cos \lambda \sin \varphi}$$

и поэтому

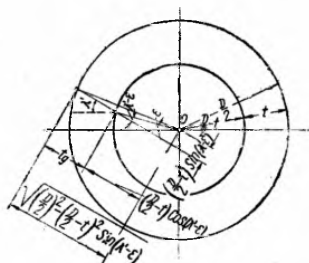
$$F = a \cdot b_0 = \frac{st}{\cos \lambda}. \quad (91)$$

Уравнение (91) справедливо не только для строгальных резцов, но также и для наружных плоских и спиральных протяжек, применяемых для протягивания цилиндрических тел вращения.

При обычном точении уравнение (91) выражает сечение стружки лишь приближенно. Более точное выражение F может быть написано на основании расчетной схемы, показанной на фиг. 45. Из схемы видно, что при любых значениях $\lambda \geq 0$ дей-



Фиг. 44.



Фиг. 45.

ствительная глубина резания t_0 всегда больше номинальной глубины резания $t = \frac{D-d}{2}$ мм. Равным образом при любых смещениях $\pm h$ мм относительно оси вращения изделия действительная глубина резания t_0 также больше номинальной величины t . Лишь при наличии одинаковых знаков угла λ и смещении h возможен частный случай, когда одновременное действие λ и h , приводящее к противоположным результатам, взаимно компенсируется, и тогда $t_0 = t$.

Выражая величину углового смещения $\pm h$ мм через угловое измерение ε ,

$$\sin \varepsilon = \pm \frac{h}{\rho}; \quad (92)$$

$$\operatorname{tg} \lambda' = \frac{\operatorname{tg} \lambda}{\sin \varphi}, \quad (93)$$

получаем на основании расчетной схемы уравнение истинной глубины резания

$$t_0 = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - t\right)^2 \sin^2(\lambda' \pm \varepsilon)} - \left(\frac{D}{2} - t\right) \cos(\lambda' \pm \varepsilon). \quad (94)$$

Тогда сечение стружки при точении выражается уравнением

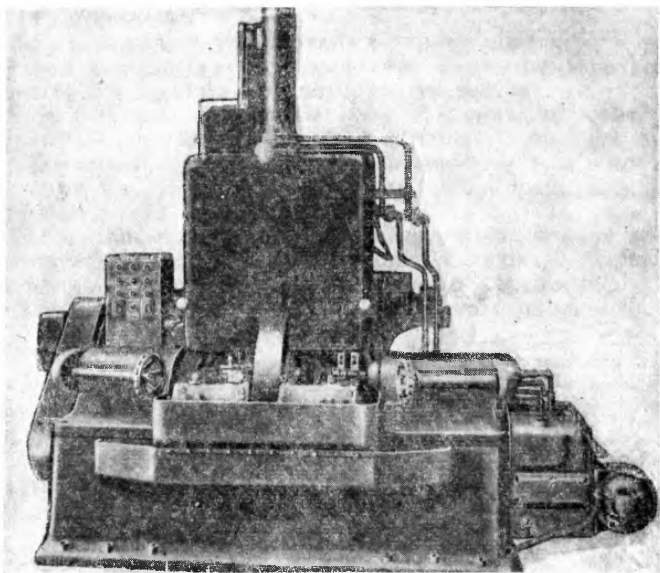
$$F = s \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - t\right)^2 \sin^2(\lambda' \pm \varepsilon) - \left(\frac{D}{2} - t\right) \cos(\lambda' \pm \varepsilon)}. \quad (95)$$

Полагая в уравнении (95) угол $\varepsilon=0$ и смещение $h=0$, получаем обычное уравнение сечения стружки

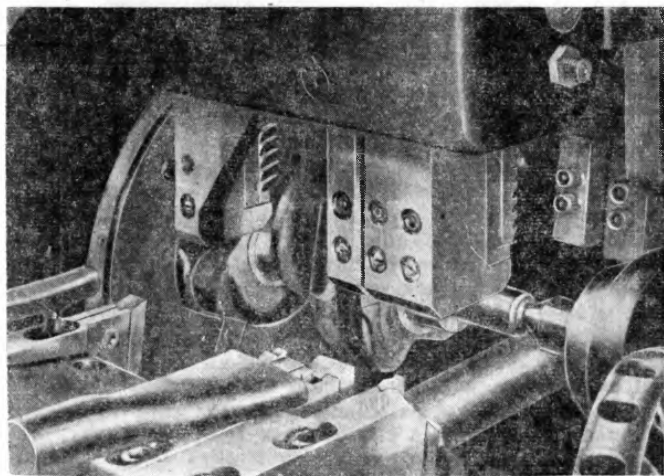
$$F = st \text{ мм}^2.$$

Примечание. В уравнении (95) знаки $\pm$ в выражениях $\sin$ и $\cos$ выбираются на основании следующих справочных данных:

при $+\lambda$ и $+\varepsilon$ и условия, что $ \lambda < \varepsilon $,	следует брать	$(\varepsilon - \lambda')$
" $+\lambda$ и $+\varepsilon$ и " " $ \lambda > \varepsilon $	" "	$(\lambda' - \varepsilon)$
" $+\lambda$ и $-\varepsilon$	" "	$(\lambda' + \varepsilon)$
" $-\lambda$ и $+\varepsilon$	" "	$(\lambda + \varepsilon)$
" $-\lambda$ и $-\varepsilon$ и условия, что $ \lambda < \varepsilon $	" "	$(\varepsilon - \lambda')$
" $-\lambda$ и $-\varepsilon$ и " " $ \lambda > \varepsilon $	" "	$(\lambda' - \varepsilon)$



Фиг. 46а.



Фиг. 46б.

Часть II

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ РЕЗАНИЯ

Во второй части работы рассматриваются исследования некоторых принципиальных кинематических схем резания применительно к обработке тел вращения протягиванием. Попытки протягивания тел вращения встречаются у некоторых иностранных фирм и на заводах СССР.

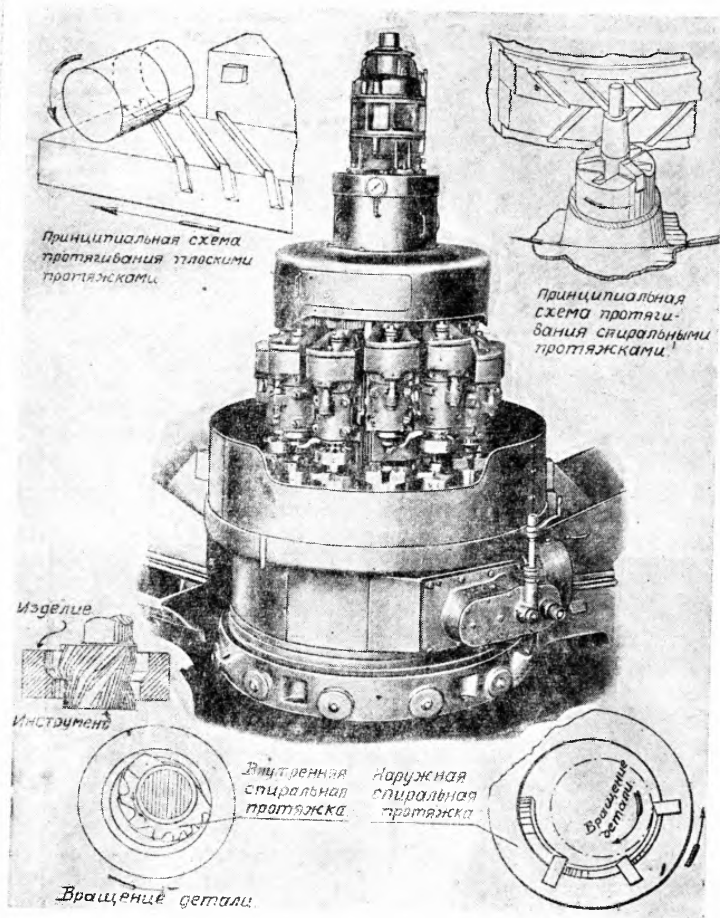
Так, американская фирма Уикес для обработки шеек коленчатого вала вместо обточки простыми и фасонными токарными резцами применяет метод протягивания плоскими протяжками. Изготовленный специально для этой цели станок с смонтированными на нем плоскими протяжками показан на фиг. 46а и б.

Другая американская фирма Буллард применяет метод внутреннего протягивания втулок спиральными протяжками вместо расточки резцами. Монтаж протяжек на станке и схема наладки показаны на фиг. 47. В Советском Союзе первые попытки применения протягивания коренных шеек коленчатых валов двигателей внутреннего горения были предприняты на Сталинградском тракторном заводе в 1935—1936 гг.

Опыты были проведены обычной круглой внутренней протяжкой, закрепленной в центрах, установленных на столе горизонтально-фрезерного станка. Во избежание прогиба протяжка снизу подпиралась парой домкратиков (фиг. 48).

В качестве обрабатываемой детали была использована стальная втулка, надетая и закрепленная на 32-мм шпindelной оправке фрезерного станка вместо обычной фрезы. Окружная скорость вращения втулки представляла собой скорость резания v м/мин, а перемещение стола вместе с закрепленной на нем протяжкой — подачу последней.

Каждый зуб протяжки, равномерно двигаясь касательно к соответствующей ему окружности вращения изделия, встречает на пути своего движения поверхность втулки и вступает в состояние контакта и резания в начальной точке H . При наличии прямолинейного касательного движения подачи s мм/об зубья протяжки срезают с поверхности втулки стружку переменной толщины a мм; траектория относительного рабочего движения зубьев протяжки — перициклоида, приближающаяся с неравномерно замедляющейся скоростью к круговой образующей обработанной



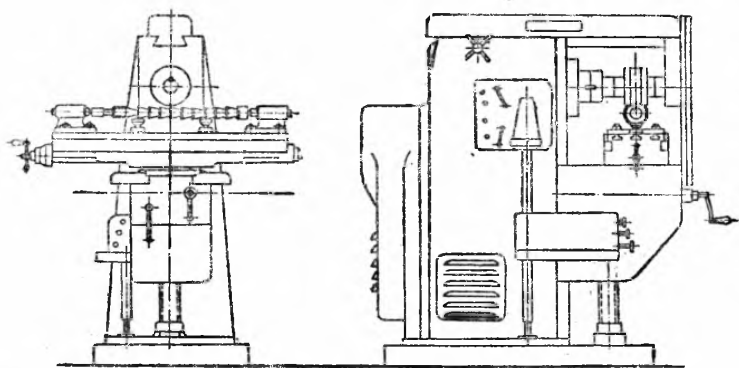
Фиг. 47.

поверхности изделия и достигающая ее в конечной точке резания *K*.

Затем режущий зуб протяжки теряет контакт с обработанной уже деталью и, продолжая свое движение в воздухе, отделяется от обработанной поверхности изделия.

Вслед за текущим зубом, уже закончившим свою работу, в состояние резания вступает следующий очередной зуб. Так продолжается до тех пор, пока мимо обрабатываемой детали проходят все зубья протяжки, после чего обработка детали заканчивается.

В этих попытках применения метода протягивания не только для обработки плоских поверхностей, но также и тел вращения, мы встречаемся с вполне закономерным стремлением технической мысли изыскать и применить в технологии машиностроения



Фиг. 48.

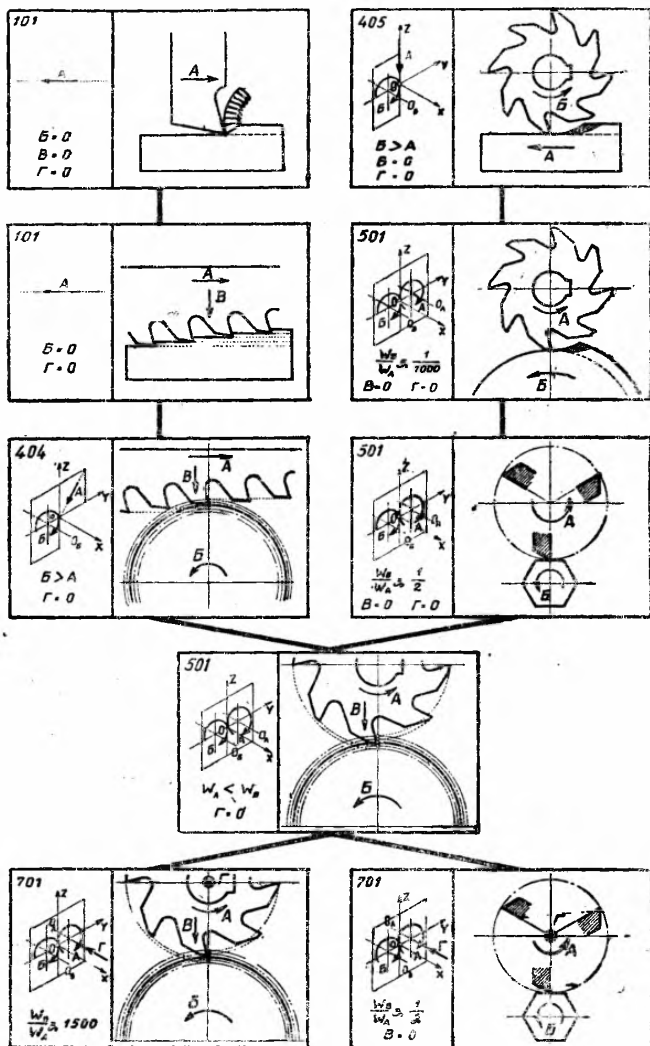
наиболее совершенные методы обработки металлов режущими инструментами.

Современные протяжки для внутреннего и наружного протягивания поверхностей с прямолинейными образующими, сочетая в себе такие положительные качества, как высокие стойкость, производительность, экономичность и качество протянутой поверхности, зарекомендовали себя как режущие инструменты с высокой степенью конструктивного совершенства.

Вполне естественно, что успех, достигнутый при протягивании плоских поверхностей, наталкивает на мысль, что применение протяжек в области обработки поверхностей тел вращения также будет эффективным. Обоснованность этих предположений подтверждается основными положениями, изложенными в части I.

Наиболее распространенными методами обработки плоских поверхностей являются строгание и фрезерование.

Переход от этих методов обработки плоскостей к методу протягивания тел вращения спиральными протяжками может быть иллюстрирован схемами (фиг. 49) в порядке последовательного изменения положенных в их основу принципиальных ки-



Фиг. 49.

нематических схем резания, сочетания и соотношения главных движений, выраженных этими кинематическими схемами резания, и использования дополнительных движений, вложенных в конструкцию инструментов и не выраженных кинематическими схемами резания.

§ 1. ПЕРЕХОД ОТ СТРОГАНИЯ К ПРОТЯГИВАНИЮ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНЫМИ ПРОТЯЖКАМИ

Строгание

В основу метода строгания положена принципиальная кинематическая схема резания 101, выражающая лишь одно равномерное прямолинейное движение A , сообщаемое инструменту (на шепинге) или изделию (на продольно-строгальном станке) как скорость резания v м/мин. Остальные возможные движения — главные B и $Г$ и вспомогательное B — на протяжении одного рабочего цикла равны нулю.

В соответствии со схемой 101 принцип строгания основан на постоянном срезании подлежащего удалению объема металла

одним единственным режущим лезвием резца за m его повторных возвратно-поступательных рабочих движений.

В течение каждого рабочего прохода в зависимости от угла и радиуса закругления r резца, глубины резания t и величины подачи s в непосредственном контакте с обрабатываемым изделием находится не вся длина режущего лезвия, а его ограниченная часть $I—K$ (фиг. 50).

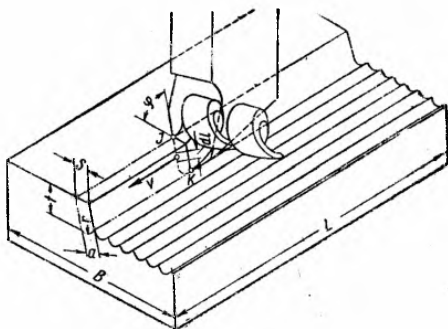
В рабочем состоянии отрезок dl режущего периметра l , равного контуру $I—K$ режущего лезвия, совершает прямолинейное движение с мгновенной скоростью резания v м/мин и на протяжении одного рабочего хода срезает стружку постоянной толщины

$$a = s \sin \varphi$$

и ширины

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}.$$

Таким образом, как отрезок dl , так и любая точка режущего лезвия совершает относительное перемещение по прямолинейной



Фиг. 50.

траектории рабочего движения. Совокупность прямолинейных траекторий всех точек режущего периметра l представляет собой поверхность резания, образуемую на изделии за каждый текущий рабочий ход строгального резца.

Но так как за каждый последующий рабочий ход большая часть наличной поверхности резания, образованной за предшествующий рабочий ход резца, срезается и превращается в стружку, а на изделии сохраняется лишь ее меньшая часть — в основном та, которая образована закругленной вершиной режущего периметра, то обработанная строганием поверхность изделия представляет собой не гладкую и ровную плоскость, а шероховатую поверхность, покрытую параллельными прямолинейными бороздами, образованными из сопряженных отрезков оставшихся меньших частей поверхности резания, равных по количеству всем m повторным рабочим ходам резца за время обработки всей поверхности детали.

Из изложенного следует, что вследствие: а) сосредоточенного приложения усилия резания к ограниченному по длине режущему периметру и примыкающей к нему контактной площадке на передней поверхности и б) образования обработанной поверхности из m остаточных полосок поверхностей резания строгальные резцы не могут обладать высокой стойкостью, а также производительностью за период стойкости, и в обычных условиях использования не обеспечивают хорошего качества обработанной поверхности. Поэтому они не дают возможности сочетать применение рабочей силы низкой квалификации с широкими возможностями автоматизации методов точной обработки деталей.

Протягивание плоских поверхностей

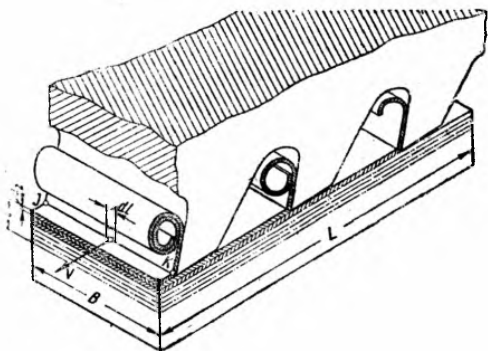
В основу метода протягивания плоских поверхностей, так же как в основу метода строгания, положена принципиальная кинематическая схема резания 101. Выраженное этой схемой прямолинейное движение A сообщается инструменту. Помимо этого, в конструкцию протяжки вложено дополнительное движение B , осуществляемое превышением каждым последующим зубом соседнего предшествующего зуба на a мм. Остальные движения — B и Γ — обычно равны нулю, хотя в случае наличия на протяжке косых зубьев движение Γ может рассматриваться как второе дополнительное движение, вложенное в конструкцию инструмента, направленное перпендикулярно к главному движению A .

В соответствии с этими движениями принцип внутреннего и наружного протягивания, подобно строганию, также основан на постоянном срезании подлежащего удалению объема металла, но только не одним единственным режущим лезвием, а столькими режущими лезвиями, сколько режущих зубьев находится на рабочей части протяжки.

Благодаря последовательному порядку расположения на общем стержне протяжки Z ее режущих зубьев, работа резания, совер-

шаемая одним режущим лезвием строгального резца за m повторных рабочих ходов, совершается протяжкой за один рабочий ход (фиг. 51).

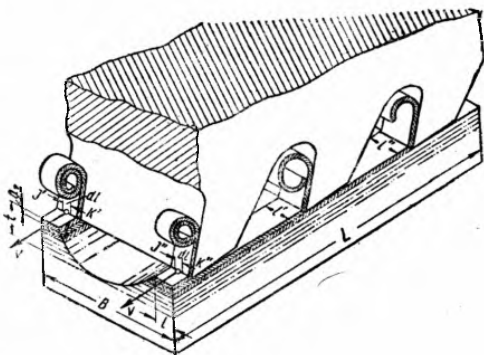
Каждый зуб протяжки, вступая в состояние резания, может находиться в непосредственном контакте с изделием как по всей длине своего режущего лезвия (фиг. 51), так и по длине отдельных его отрезков (фиг. 52). Следовательно, на каждом текущем зубе протяжки режущий периметр l может иметь свою собственную длину, отличающуюся от длины режущего периметра соседних зубьев, и может оставаться постоянным по длине для целой группы зубьев или же всех Z рабочих зубьев протяжки.



Фиг. 51.

В противоположность строгальному резцу, выполняющему всю работу резания при обработке детали ограниченным по

длине режущим периметром l своего единственного режущего лезвия, протяжка выполняет ту же работу режущим периметром, равным сумме Σl длин режущих периметров всех ее Z рабочих зубьев. Именно в этом и заключается причина высокой стойкости и производительности протяжек за период от и до переточки.



Фиг. 52.

В рабочем состоянии произвольный отрезок dl режущего периметра l каждого зуба протяжки, подобно режущему лезвию строгального резца, совершает прямолинейное движение, но только с постоянной скоростью v м/мин. При наличии дополнительного движения B , вложенного в конструкцию как вышеуказанное каждым последующим зубом предшествующего, протяжка не нуждается в механизме подачи и срезает по всей длине протягиваемого изделия стружку постоянной толщины a мм.

Каждая точка режущего периметра любого из зубьев протяжки имеет траекторией своего относительного рабочего движения прямую линию. Совокупность этих прямолинейных траекторий образует поверхность резания и предопределяет прямолинейность ее образующих.

В случае применения профильного метода протягивания поверхность резания, образованная режущим периметром последнего зуба протяжки, является одновременно и относительно гладкой и ровной обработанной поверхностью с прямолинейными образующими.

В случае применения генераторного метода протягивания обработанная поверхность изделия представляет собой совокупность остаточных полосок поверхностей резания, образованных в процессе протягивания всеми рабочими зубьями и сливающимися в одну общую плоскость или поверхность с прямолинейными образующими, сглаживаемую при этом профильными калибрующими зубьями протяжки.

Точность размеров и качество поверхностей протянутых деталей зависят от точности изготовления, степени остроты режущих лезвий и величины передних углов на зубьях протяжек.

В способности как профильных, так и генераторных протяжек обеспечивать на больших партиях протягиваемых деталей полное подобие формы, высокую точность размеров и ровные и гладкие обработанные поверхности заключается сущность оценки протяжек как инструментов высокой точности, производительности и экономичности.

Из сопоставления методов строгания и протягивания следует, что, несмотря на совершенно различные схемы резания и условия работы режущих лезвий, строгальные резцы и протяжки имеют некоторую общность, выражающуюся в том, что в основу этих инструментов положена одна и та же принципиальная кинематическая схема резания 101, приводящая к полной аналогии траекторий их относительного рабочего движения и к одинаковым математическим выражениям углов в движении α_∂ , $\alpha_{заз}$, λ_∂ и γ_∂ .

Общность указанных признаков дает некоторые основания придерживаться точки зрения, что в основу каждого зуба протяжки положен широкий строгальный резец и вся протяжка в целом представляет соединение в одном инструменте последовательно расположенных строгальных резцов.

Протягивание тел вращения плоскими протяжками

При строгании и протягивании плоских поверхностей движение *A* схемы 101 сообщалось инструменту при неподвижном положении обрабатываемого изделия, т. е. при втором главном движении $B=0$.

Положим, что от схемы 101 мы перешли к схеме 201. Второе главное движение *B*, сообщаемое изделию, прямолинейно, равномерно и направлено параллельно, но в сторону, противо-

положную первому главному движению A , сообщаемому инструменту. Кроме увеличения абсолютной скорости относительного перемещения изделия и инструмента, это не повлечет за собой никаких других изменений в условиях работы, а также величины углов в движении на инструменте и образовании им обработанной поверхности на изделии.

Но оба равномерных прямолинейных главных движения A и B можно рассматривать как вращательные движения вокруг удаленных в бесконечность центров вращения O_A и O_B .

Полагая, что центр O_A остается удаленным в бесконечность, а центр O_B постепенно приближается и его положение определяется радиусом вращения r некоторой конечной величины, получаем переход от принципиальной кинематической схемы 201 к схеме 404.

Сообщая попрежнему равномерное прямолинейное движение A протяжке, а противоположно направленное вращательное движение B — изделию, при соотношениях скоростей движения $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} \leq 1$ вплоть до величин порядка 0,01 получаем траектории относительного рабочего движения, лишенные практической ценности для профилирования обработанных поверхностей на изделиях.

Но начиная от соотношений $\varepsilon = \frac{v_A}{v_B} \leq 0,01$, в диапазоне от 0,01 до 0,001 на принципиальной кинематической схеме резания 404 могут быть основаны:

- а) фасонная обточка тангенциальными резами;
- б) наружное протягивание тел вращения плоскими протяжками.

В обоих случаях движение A , сообщаемое инструменту, является подачей, выраженной в мм/об изделия, а движение B , сообщаемое изделию, является скоростью резания, выраженной в м/мин . Средняя величина подачи $s = 0,1 \div 0,3 \text{ мм/об}$; средняя скорость резания $v = 40 \div 80 \text{ м/мин}$.

Движение A подачи инструментов в обоих случаях направлено по касательной, отстоящей от оси вращения изделия на расстоянии, предопределяемом размерами обрабатываемого тела вращения.

Начальный момент резания каждой точки режущего периметра лезвия фасонного тангенциального резца и лезвия протяжки совпадает с моментом соприкосновения с обрабатываемой поверхностью изделия в начальной точке H .

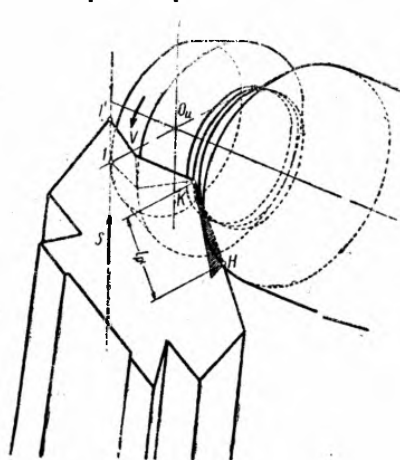
Траекторией относительного рабочего движения каждой точки режущего лезвия этих инструментов является плоскостная спираль (часть I, табл. 2, схема 404), приближающаяся с неравномерно замедляющейся скоростью к круговой образующей окончательно обработанного изделия и достигающая ее в конечный момент резания в точке K .

Специфической конструктивной особенностью тангенциальных резцов является наклонная заточка передней поверхности так, что режущее лезвие образует с направлением движения A (по-

дачи s) угол φ в пределах $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ или же с перпендикуляром к направлению движения A угол отклонения стружки λ , тоже в пределах $90^\circ > \lambda > 0^\circ$.

Это конструктивное мероприятие позволяет удлинить режущее лезвие и иметь одновременно в состоянии резания не всю его длину, а лишь ограниченную часть $H-K$ (фиг. 53). По мере перемещения тангенциального резца в направлении движения подачи s режущий периметр $H-K$ как бы скользит вдоль режущего лезвия резца, сохраняя или изменяя свою длину в зависимости от конфигурации обрабатываемой детали.

Благодаря наклонной под углом φ заточке передней поверхности процесс резания тангенциальными резцами характеризуется



Фиг. 53.

тремя движениями: главными движениями A и B , сообщаемыми инструменту и изделию механизмом станка и учитываемыми принципиальной кинематической схемой 404, и одним дополнительным движением Γ , вложенным в конструкцию инструмента и зависящим от величины угла λ и принципиальной кинематической схемой не учитываемым.

Поверхности резания, образованные в ходе работы тангенциальных резцов, имеют своими образующими отрезки плоскостных спиральных траекторий относительного рабочего движения точек режущего периметра.

Вследствие наличия дополнительного движения Γ режу-

щий периметр $H-K$ за каждый оборот изделия перемещается вдоль режущего лезвия на величину

$$\Delta l = \frac{s}{\cos \varphi} = \frac{s}{\sin \lambda},$$

и вдоль оси изделия на величину

$$s_0 = s \operatorname{tg} \varphi = \frac{s}{\operatorname{tg} \lambda}.$$

Отдельные точки лезвия приходят в конечную точку резания K не одновременно, а последовательно, располагаясь по окружности обрабатываемого изделия в порядке винтовой линии с шагом s_0 мм. Поэтому изделия, обработанные тангенциальными резцами, не обладают совершенно гладкой и ровной обработанной поверхностью. Эта поверхность образована, как при обычном точении, совокупностью сопряженных витков винтообразно

расположенной остаточной полоски поверхности резания, образуемой инструментом за каждый оборот изделия.

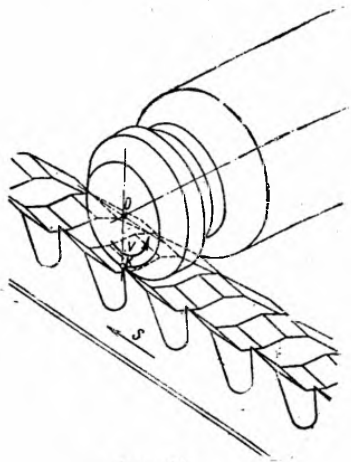
Характерной особенностью работы тангенциальных резцов является постепенное образование окончательно обработанной поверхности на изделии скользящим режущим периметром $H-K$ одного режущего лезвия, расположенного наклонно под углом λ .

Во избежание вредных последствий, отмеченных при рассмотрении первых опытов по наружному протягиванию тел вращения на протяжках, так же как и на тангенциальных резцах, режущие зубья должны быть расположены наклонно под углом φ к оси протяжки или под углом λ к перпендикуляру к этой оси.

Тогда процесс резания каждого в отдельности рассматриваемого зуба протяжки, применяемой для протягивания тел вращения, уподобляется работе тангенциального резца.

Положительной стороной, весьма выгодно отличающей метод протягивания от метода точения тангенциальными резцами, является наличие на протяжках Z рабочих зубьев и распределение между ними всей работы резания при обработке одной детали.

По этой причине суммарная длина Σl режущего периметра протяжки примерно в Z раз больше режущего периметра тангенциального резца. Естественно, что вследствие этого динамическая и тепло-



Фиг. 54.

вая напряженность, предопределяющая интенсивность износа режущих элементов зуба протяжки, значительно ниже, чем это имеет место на тангенциальных резцах.

Превышение каждым последующим зубом протяжки предшествующего предопределяет глубину резания t за один проход, а число повторных проходов за время полной обработки одной детали равно числу Z ее рабочих зубьев.

Таким образом, процесс резания плоскими протяжками при обработке ими тел вращения (фиг. 54) характеризуется четырьмя движениями: двумя главными движениями A и B , сообщаемыми инструменту и изделию механизмом станка и выражаемыми принципиальной кинематической схемой резания 404, и двумя дополнительными движениями B и $Г$, вложенными в конструкцию протяжки и кинематической схемой не выражаемыми.

Первое дополнительное движение B тождественно поперечной подаче, являющейся в рассматриваемом случае, так же как при наружном круглом шлифовании, глубиной резания t мм за

проход, и достигается превышением каждым последующим зубом протяжки соседнего предшествующего.

Второе дополнительное движение Γ тождественно продольной подаче s_0 и достигается выполнением на протяжке наклонного зуба, образующего с осью протяжки угол $\lambda > 0^\circ$.

Следует отметить, что общность в условиях работы строгальных резцов и протяжек, отмеченная при обработке плоских поверхностей по схемам 101 и 201, дала основание придерживаться точки зрения, что в основу каждого зуба протяжки положен строгальный резец, и вся протяжка представляет собой соединение в одном инструменте z последовательно расположенных строгальных резцов. Эта точка зрения не соответствует условиям работы тех же протяжек при протягивании ими тел вращения.

В измененных условиях работы каждого зуба протяжки по схеме 404 теперь можно усмотреть некоторую общность с работой тангенциальных резцов, что дает основание придерживаться точки зрения, что вся протяжка представляет соединение в один инструмент z последовательно расположенных тангенциальных резцов.

Рассматриваемый случай может служить ярким примером, как при сохранении неизменными конструктивной формы и размеров инструмента, только в зависимости от характера, количества и соотношения сочетаемых движений могут меняться принцип работы, производственная эффективность и ценность достигнутых результатов.

Переход к протягиванию тел вращения спиральными протяжками

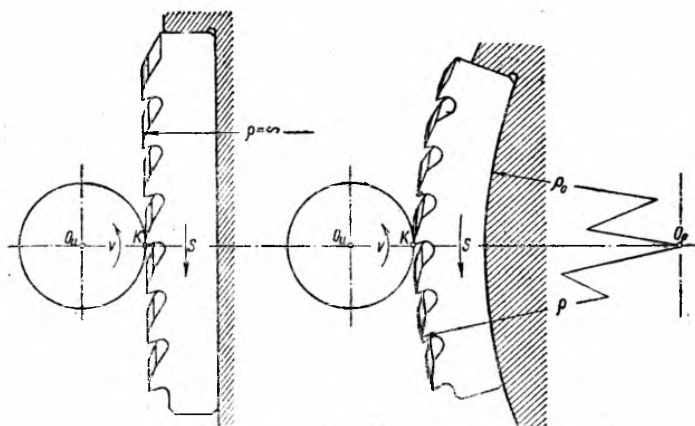
Обладая высокими конструктивными достоинствами и эксплуатационными качествами, плоские протяжки тем не менее лишены и некоторых недостатков. К ним, во-первых, относится необходимость совершать непроизводительные обратные ходы и перебеги, вызывающие потерю времени.

Во-вторых, прямолинейный возвратно-поступательный характер движения плоских протяжек требует рабочего хода большой длины. Это сильно увеличивает габариты протяжного станочного парка и размеры площадей, занимаемых этими станками в производственных помещениях.

В-третьих, прямолинейный возвратно-поступательный характер движения плоских протяжек сильно ограничивает возможности автоматизации процессов обработки деталей.

Стремление уменьшить до минимума непроизводительные потери времени на холостые движения, совершаемые инструментом и механизмом станка, габариты оборудования и размеры площадей, занимаемых им в производственных помещениях, и расширить возможности автоматизации процессов обработки деталей находит свое разрешение в переходе от плоских протяжек к новому конструктивному типу вращающихся спиральных протяжек, в основу работы которых положена принципиальная кинематическая схема резания 501.

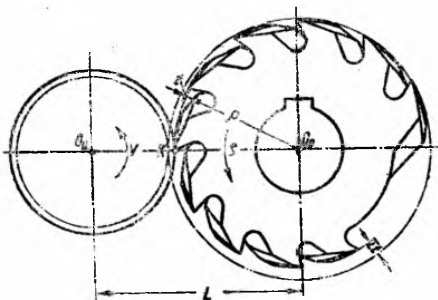
Прямолинейное движение A , сообщаемое плоской протяжке по схеме резания 404, рассматриваемое как перемещение по дуге окружности бесконечно большого радиуса, в самой идее



Фиг. 55.

этого движения исключает всякую возможность реального осуществления замкнутого и непрерывного кругового движения одной протяжки или суммы протяжек, расположенных на этой окружности.

Прямолинейное возвратно-поступательное движение плоских протяжек можно рассматривать как маятниковое качание протяжки по дуге круга бесконечно большого радиуса, и поэтому необходимы холостые возвратные перемещения протяжки, приводящие ее в исходное положение после каждого очередного рабочего хода.



Фиг. 56.

Если представить, что удаленный в бесконечность центр вращения прямолинейно двигающейся плоской протяжки постепенно приближается, то радиус вращения протяжки теряет свое бесконечно большое значение и приобретает некоторую конечную длину ρ . Одновременно принципиальная кинематическая схема резания 404 переходит в схему 501 и вместе с этим представление о прямолинейном движении протяжки заменяется представлением о движении точек режущего лезвия протяжки по окружности этого конечного радиуса ρ мм (фиг. 55). Ось тела про-

тяжки также перестает быть прямолинейной и превращается в дугу окружности радиуса ρ . Таким образом, вращающуюся спиральную протяжку можно рассматривать как обычную плоскую наружную протяжку, наведенную на цилиндр радиуса ρ_0 (фиг. 55), и в соответствии с этим процесс резания при протягивании тел вращения характеризуется четырьмя движениями: двумя главными движениями A и B , сообщаемыми инструменту и изделию механизмом станка и выражаемыми принципиальной кинематической схемой резания 501, и двумя дополнительными движениями B и Γ , вложенными в конструкцию протяжки и кинематической схемой не выражаемыми. Оба дополнительных движения сохраняют тот же смысл, что и для плоской протяжки.

Взаимное расположение спиральной протяжки и обрабатываемого изделия показано на фиг. 56. Во время работы механизм станка сообщает спиральной протяжке вращательное движение вокруг оси O_p , являющееся подачей s , и протягиваемому телу вращения то же направление вращения вокруг параллельной оси O_u , являющееся скоростью резания. Расстояние L между осями O_p и O_u остается неизменным на протяжении всего периода обработки детали.

§ 2. ПЕРЕХОД ОТ ФРЕЗЕРОВАНИЯ К ПРОТЯГИВАНИЮ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНЫМИ ПРОТЯЖКАМИ

Фрезерование цилиндрическими фрезами

В основу метода фрезерования положена принципиальная кинематическая схема резания 405, выражающая сочетание двух одновременно действующих главных движений A и B .

Равномерное вращательное движение A , сообщаемое инструменту, является скоростью резания v , а прямолинейное движение B , сообщаемое изделию, — подачей s .

Вследствие того что все зубья фрезы расположены на окружности одного радиуса, дополнительное движение $B=0$.

При наличии на фрезе винтового зуба касательная к которому образует с осью фрезы угол $\lambda > 0^\circ$, имеет место второе дополнительное движение Γ , физическое значение которого подобно положению, создающемуся при наличии косых зубьев на плоской протяжке (осевая подача s_0). На фрезях с прямыми зубьями дополнительное движение $\Gamma=0$.

Метод фрезерования цилиндрическими фрезами заключается в постепенном срезании тонкими слоями переменной толщины всего подлежащего удалению объема металла за $\frac{L}{Z \cdot s_z}$ оборотов

фрезы, имеющей по окружности Z режущих зубьев.

В каждое мгновение работы фрезы в зависимости от ее диаметра D , числа зубьев Z , угла наклона λ винтовых зубьев и ширины фрезерования B_0 в непосредственном контакте с обрабатываемым изделием находится некоторая мгновенная длина режущего периметра, равная сумме Σl длин режущих периме-

тров l отдельных, находящихся одновременно в состоянии резания, зубьев фрезы (фиг. 57).

В общем случае за каждый оборот фрезы длины режущего периметра l каждого из одновременно работающих зубьев и их сумма Σl периодически меняется Z раз.

Лишь при таком сочетании всех вышеперечисленных факторов, когда в уравнении равномерности фрезерования

$$K = \frac{Z B_0 \operatorname{tg} \lambda}{\pi D}$$

число K принимает целое значение, равное 1, 2, 3 и т. д., сумма Σl режущих периметров всех одновременно работающих зубьев ее остается величиной постоянной на протяжении всего периода фрезерования.

В соответствии со схемой резания, показанной на фиг. 57, режущий периметр каждого зуба цилиндрической фрезы за $\frac{L}{Z \cdot s_z}$ повторных рабочих

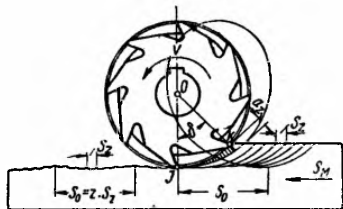
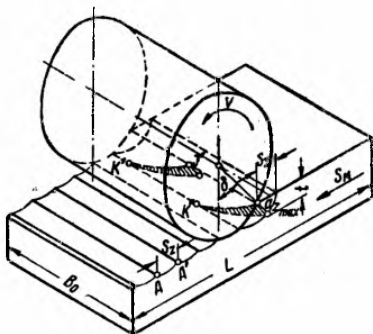
цикла выполняет $\frac{1}{Z}$ часть всей

работы резания, затрачиваемой фрезой в целом на обработку одной детали. В этом преимущество метода фрезерования перед строганием и причина большей стойкости и больших режимных возможностей фрезы. Но так как среднее число зубьев у фрезы меньше, чем среднее число зубьев у протяжки, то за время обработки одной детали каждый зуб фрезы имеет $\frac{L}{Z \cdot s_z}$ повторных рабочих циклов, тогда как

за время обработки одной такой же детали каждый зуб протяжки имеет всего лишь один рабочий цикл. Поэтому метод фрезерования неизбежно должен уступить и на практике всегда уступает методу протягивания по экономичности, стойкости и производительности за период стойкости.

В процессе фрезерования траекторией относительного рабочего движения точки M режущего периметра зуба фрезы является траходна.

Образованная при фрезеровании поверхность резания представляет собой совокупность отрезков AB траход. Каждый последующий зуб фрезы, срезая проходящийся на его долю слой



Фиг. 57.

металла переменной толщины a_z мм/зуб (меняющийся при направлении подачи против вращения фрезы от нуля до максимума, а при направлении подачи — по вращению фрезы от максимума до нуля), превращает в стружку и удаляет с изделия большую часть наливной поверхности резания, образованной предшествующим зубом фрезы, оставляя ее меньшую часть в виде узкой полоски шириной s_z мм между точками A и A_1 , расположенной вдоль ширины B обрабатываемого изделия.

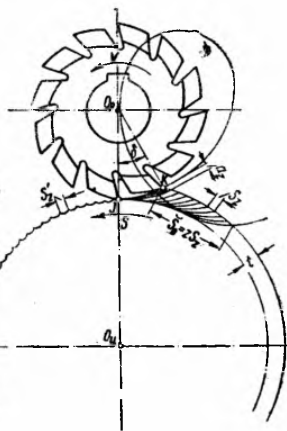
Следовательно, поверхность изделия, обработанная цилиндрическими фрезами, образована сопряжением $\frac{L}{s_z}$ вогнутых поло-

сок остаточных поверхностей резания цилиндрического класса и по этой причине не может быть совершенно гладкой и ровной. Помимо указанной причины действительная интегральная шероховатость фрезерованной поверхности определяется величиной биения фрезы и фрезерной оправки за каждый ее оборот.

В этом отношении метод фрезерования цилиндрическими фрезами более близок к методу строгания, чем к протягиванию.

Фрезерование тел вращения

Прямолинейное движение B кинематической схемы 405, сообщаемое изделию как движение подачи, можно рассматривать как вращательное движение по окружности бесконечно большого радиуса ρ .



Фиг. 58.

Если представить, что радиус ρ приобретает некоторую конечную длину, то схема 405 переходит в схему 501, выражающую сочетание двух вращательных главных движений A и B .

Сообщая одно из них, например A , инструменту, а другое — B изделию, получаем при соотношениях $i = \frac{\omega_A}{\omega_B} \approx 0,005$ метод фрезерования тел вращения (фиг. 58).

Так же как при фрезеровании плоских деталей, первое дополнительное движение B , тождественное поперечной подаче, равной глубине резания t за один проход и достигаемой заточкой зубьев с превышением одного зуба над другим,

вследствие отсутствия такого превышения на фрезах, равно нулю.

Второе дополнительное движение Γ , тождественное продольной подаче s_0 и достигаемое изготовлением на фрезах винтообразно расположенных зубьев в зависимости от величины угла наклона $\lambda \geq 0^\circ$, может быть больше или равно нулю.

Метод фрезерования тел вращения, таким образом, сохраняет все характерные положительные и отрицательные стороны фрез, и этому методу может быть дана та же техническая оценка, что и методу фрезерования плоских деталей.

Протягивание тел вращения спиральными протяжками

В основу работы спиральных протяжек и фрез при обработке тел вращения, согласно фиг. 56 и 58, положена одна и та же принципиальная кинематическая схема резания 501.

Возможность получения на основе одной принципиальной кинематической схемы резания двух или нескольких совершенно не сходных между собой методов обработки деталей за счет изменения отношения сочетаемых движений была отмечена уже раньше. В этом смысле исследование принципиальной кинематической схемы 501 представляет теоретический интерес и может служить примером, как за счет комбинации и изменения соотношения главных и дополнительных движений представляется возможным создать и обосновать новые, до настоящего времени либо совершенно неизвестные, либо на практике мало применяемые методы обработки деталей, обладающие высокими технико-экономическими показателями.

В соответствии со схемой обработки тел вращения спиральными протяжками в процессе резания одновременно совершают равномерное вращение по часовой стрелке режущий инструмент с окружной скоростью v_{np} и обрабатываемая деталь с окружной скоростью $v_{изд}$. Положим, что соотношение этих скоростей

$$\varepsilon_1 = \frac{v_{изд}}{v_{np}} < 1.$$

Тогда в первой зоне при достаточно малом отношении ε_1 каждая точка режущего лезвия зубьев вращающейся спиральной протяжки на пути своего рабочего движения вступит в контакт с обрабатываемым изделием и начнет процесс резания в начальной точке H .

Через некоторый промежуток времени τ спиральная протяжка повернется против часовой стрелки на угол ω_{np} и рассматриваемая точка ее режущего лезвия переместится из точки H начала в точку K конца резания.

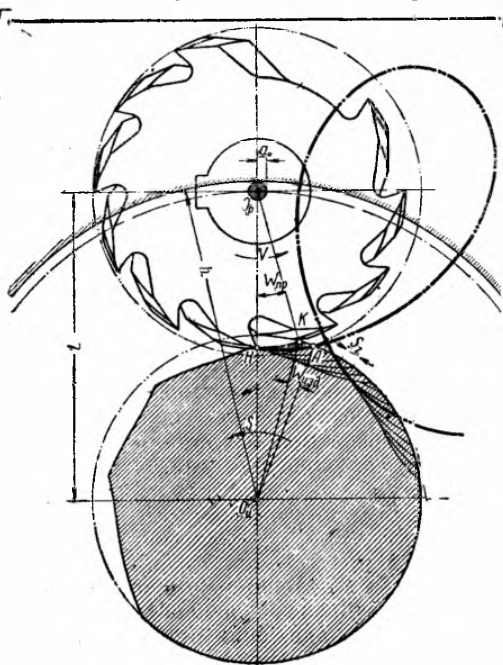
За этот же промежуток времени τ обрабатываемое изделие тоже повернется против часовой стрелки, но только на угол $\omega_{изд}$. Вследствие этого в конечный момент резания одновременно с рассматриваемой точкой режущего лезвия в точку K придет некоторая точка A на наружной обрабатываемой поверхности изделия (фиг. 59).

Дуга AK определяет максимальную толщину стружки, срезаемую за рабочий цикл рассматриваемой точкой лезвия спиральной протяжки.

При достаточно малом отношении $\epsilon_1 < 1$, когда дуга $AK \approx 0,03$ до $0,2$ мм, окружная скорость $v_{изд}$ вращения обрабатываемого изделия тождественна движению подачи s_z мм/зуб протяжки, а окружная скорость вращения режущих зубьев спиральной протяжки — скорость резания v м/мин. Оба вектора подачи и скорости v лежат в одной плоскости, перпендикулярной к осям O_u и O_p . Аналогичные перемещения повторяются для

всех z рабочих зубьев равномерно вращающейся спиральной протяжки и общая схема резания (фиг. 59) приводит к имитации ею метода фрезерования тел вращения.

Отнеся обрабатываемое изделие к неподвижной полоиде радиуса b_0 с центром, совпадающим с геометрической осью изделия в точке O_u , а инструмент к подвижной полоиде радиуса a_0 с центром, совпадающим с геометрической осью инструмента в точке O_p , можно рассматривать относительное перемещение инструмента и изделия как предопределяемое качением без



Фиг. 59.

скольжения подвижной полоиды внутри неподвижной. Траекторией относительного рабочего движения точек режущего лезвия зубьев спиральной протяжки в первой зоне отношений $\epsilon_1 < 1$ является удлиненная гипоциклоида, а поверхность резания, образованной каждым зубом протяжки, — совокупность отрезков удлиненных гипоциклоид.

Поверхность, обработанная на изделии спиральной протяжки при $\epsilon_1 < 1$, состоит из сопряженных полосок остаточных отрезков поверхностей резания каждого зуба, но вследствие наличия дополнительного движения B , выражающегося как превышение каждым последующим зубом протяжки соседнего предшествующего, имеет форму не тела вращения, а граненую с криволинейным очертанием граней (фиг. 59).

Практическая ценность деталей с подобным очертанием контура весьма ограничена. Это дает основание сделать заключение, что хотя при соотношениях $\varepsilon_1 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} < 1$ и длина дуги

$AK = s_z = 0,03$ до $0,2$ мм/зуб процесс резания спиральными протяжками возможен, тем не менее сомнительно, чтобы при указанных соотношениях они могли бы найти сколько-нибудь широкое практическое использование.

Пусть в пределах того же знака неравенства соотношение $\varepsilon_2 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} < 1$ постепенно возрастает, т. е. пусть $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$. Тогда

дуга AK будет возрастать и окажется всегда больше $0,2$ мм/зуб. Хотя и при ε_2 сохраняется имитация протяжки метода фрезерования тел вращения, тем не менее практически процесс резания исключен, ибо толщина стружки, срезаемая одним зубом, окажется недопустимо большой.

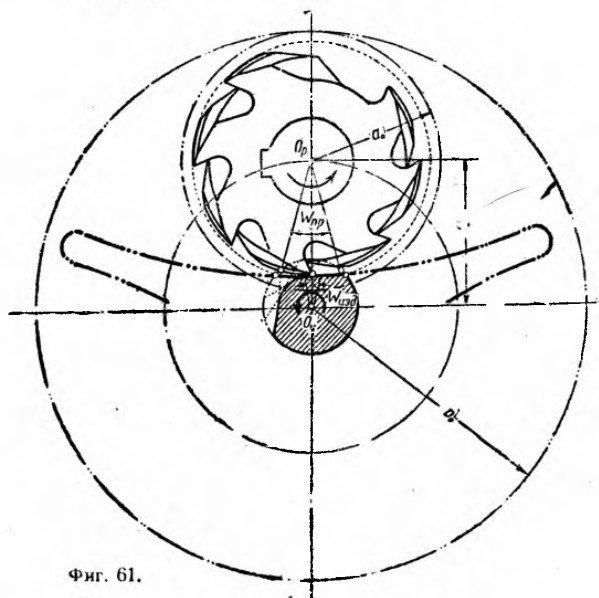
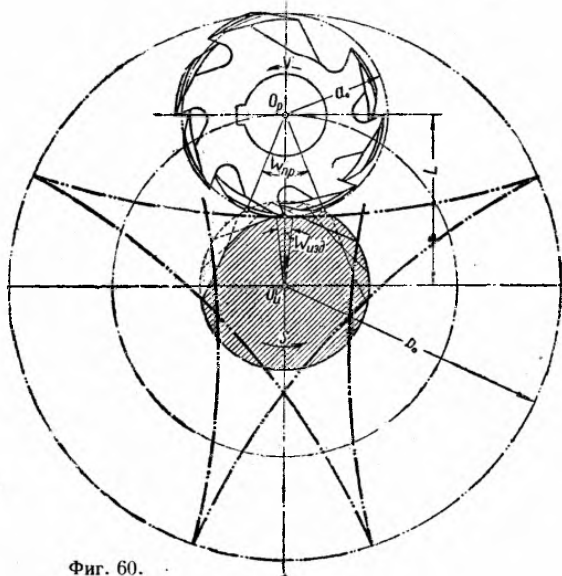
С возрастанием соотношения скоростей вращения изделия и инструмента ε_2 радиус b_0 неподвижной полоиды, к которой отнесено изделие, уменьшается, а радиус a_0 подвижной полоиды, к которой отнесена спиральная протяжка, постепенно увеличивается. Во второй зоне траекторией относительного рабочего движения попрежнему остается удлиненная гипоциклоида.

В том частном случае, когда радиус точки M режущего лезвия протяжки по величине окажется равным радиусу a_0 подвижной полоиды, траекторией относительного рабочего движения этой точки M (фиг. 60) является математически точная гипоциклоида. Кривизна гипоциклоидальной траектории зависит от отношения радиусов подвижной и неподвижной полоид и уменьшается с возрастанием этого отношения. В частном случае,

когда $\frac{a_0}{b_0} = \frac{1}{2}$, кривизна гипоциклоиды равна нулю и она выпрямится в прямую, совмещающуюся с диаметром неподвижной полоиды.

Практическая ценность гипоциклоидальных траекторий относительного рабочего движения столь же ограничена с точки зрения возможности их использования в качестве контурных линий, очерчивающих профиль граненого поперечного сечения детали, как и удлиненных гипоциклоид. Кроме того, не всегда возможно получить замыкающиеся циклы и очертить отрезками ветвей гипоциклоид вполне определенные симметричные или асимметричные фигуры (фиг. 60).

При желании иметь математическую гипоциклоиду в качестве траектории относительного рабочего движения предельные габаритные размеры обрабатываемого изделия уменьшаются с приближением отношения радиусов a_0 и b_0 полоидных окружностей к значению $1/2$. Естественно, что контур, очерчиваемый выпрямленными гипоциклоидами, совмещающимися при $\frac{a_0}{b} = \frac{1}{2}$ с диа-



метром неподвижной полоиды, сводится к математической точке т. е. к габаритным размерам изделия, равным нулю. По этой причине выпрямленная гипоциклоида не может быть использована для практических целей обработки по ней граненых поверхностей на изделиях.

Дальнейшее увеличение отношения $\epsilon_3 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} < 1$ так, что $\epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$, приводит к тому, что при отношении радиусов полоидных окружностей $\frac{a_0}{b_0} = i$ и необходимости иметь некоторые конечные габаритные размеры обрабатываемых изделий радиус a_0 подвижной полоиды становится больше радиуса точки M режущего лезвия спиральной протяжки, и поэтому траекторией ее относительного рабочего движения является укороченная гипоциклоида.

В зависимости от величины смещения точки M режущего лезвия внутрь подвижной полоидной окружности укороченная гипоциклоида может быть вогнутой (фиг. 61) или же выпуклой (фиг. 63). Переходу от вогнутой к выпуклой форме соответствует частный вид выпрямленной укороченной гипоциклоиды. Этот частный вид показан на фиг. 62.

По мере роста отношения $\epsilon = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} < 1$ сходство с методом фрезерования тел вращения постепенно теряется и в третьей зоне; при отношении ϵ_3 это сходство утрачено в такой степени, что схема резания уже не имитирует процесс фрезерования, а является новым, самостоятельным методом, не сходным ни с одним из известных методов обработки металлов резанием.

При вполне определенных отношениях $i = \frac{a_0}{b_0}$ радиусов полоидных окружностей и расположении точки M режущего лезвия внутри подвижной полоидной окружности на основе принципиальной кинематической схемы 501 могут иметь место такие соотношения ϵ_3 скоростей вращения изделия и инструмента, которые могут быть использованы для обработки деталей граненого сечения с вполне определенным симметричным или асимметричным фигурным очертанием.

Методу обработки граненых тел, основанному на этих соотношениях и имеющему теоретический интерес и практическую ценность, посвящено более детальное исследование, изложенное ниже в § 16.

Пределом гипоциклоидальных траекторий относительного рабочего движения точек режущих лезвий спиральных протяжек является отношение радиусов полоидных окружностей $\frac{a_0}{b_0} = 1$.

Этому отношению соответствует также $\epsilon_3 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} = 1$. По мере приближения $\epsilon_3 \rightarrow 1$ радиус a_0 подвижной полоиды непрерывно увеличивается и неограниченно приближается к величине радиуса b_0 неподвижной полоиды. Одновременно с этим сближаются также и центры O_p и O_u . Когда $\epsilon_3 = 1$, радиусы полоидных

окружностей a_0 и b_0 равны и центры O_p и O_u совмещаются. Размеры спиральных протяжек и обрабатываемых ими изделий определяются расстоянием L между центрами O_p и O_u . По мере того, как $\varepsilon_3 \rightarrow 1$ они непрерывно уменьшаются, и когда $\varepsilon_3 = 1$, а центры O_p и O_u совпадают, уменьшаются до нуля.

Продолжая увеличивать отношение окружных скоростей вращения изделия и спиральной протяжки, получаем следующую (четвертую) зону, в которой отношение $\varepsilon_4 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} > 1$.

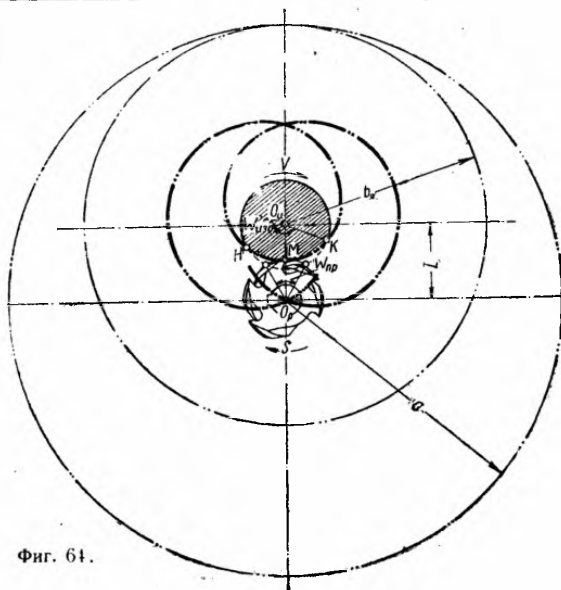
В отличие от первых трех зон, когда $a_0 < b_0$ и поэтому траекториями относительного рабочего движения являлись гипопициклоидальные кривые, описываемые точками режущих лезвий спиральной протяжки, перекатывающейся своей подвижной полоидной окружностью внутри неподвижной полоидной окружности изделия, в четвертой зоне, в силу обратного неравенства радиусов полоидных окружностей $a_0 > b_0$, подвижная полоидная окружность протяжки перекачивается не внутри, а снаружи неподвижной полоидной окружности. Вследствие этого точки режущих лезвий протяжки имеют траекториями своего относительного рабочего движения перипициклоидальные кривые.

Схема резания при $\frac{a_0}{b_0} > 1$ и один виток перипициклоиды показаны на фиг. 64. На пути своего относительного перемещения точка M режущего лезвия спиральной протяжки вступает в контакт с изделием в точке H начала резания и теряет контакт в точке K конца резания. На пути между точками H и K точка M срезает с поверхности изделия некоторый слой металла.

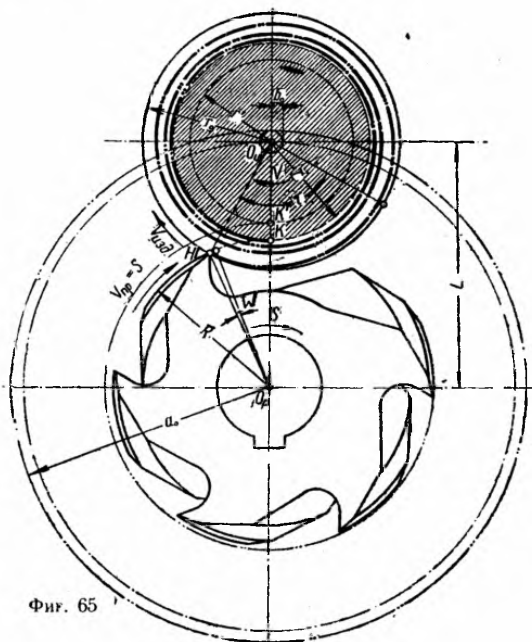
Следующий зуб протяжки, перемещаясь относительно изделия по аналогичному витку перипициклической траектории рабочего движения, в другом месте срежет с поверхности изделия соответствующий ему слой металла. В результате работы всех зубьев протяжки обработанная поверхность окажется очерченной по многогранному контуру с выпуклыми гранями.

В противоположность первым трем зонам в четвертой зоне, когда $\varepsilon_4 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} > 1$, окружная скорость изделия тождественна скорости резания v м/мин, а окружная скорость протяжки — подаче s мм/об изделия. Абсолютные величины этих скоростей и их отношение ε_4 зависят от размеров радиусов обрабатываемого изделия и протяжки и размеров полоидных окружностей. Сумма радиусов изделия и протяжки равна разности радиусов полоидных окружностей, т. е. расстоянию L между центрами вращения O_p и O_u . По причинам, отмеченным при рассмотрении третьей зоны отношений ε_3 , четвертая зона при отношениях ε_4 , близких к 1, также практической ценности не имеет.

Практическую ценность принципиальная кинематическая схема резания 501 приобретает снова лишь в последней, пятой, зоне, когда отношение окружных скоростей ε_5 значительно превосходит единицу и лежит в диапазоне $\varepsilon_5 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} \gg 100$. Тогда наруж-



Фиг. 64.



Фиг. 65

ная окружность заготовки изделия радиуса r_0 окажется отодвинутой от оси протяжки O_p на расстояние, достаточное для размещения спиральной протяжки технически целесообразных и практически осуществимых размеров. Общее расстояние L между центрами O_p и O_u равно сумме радиусов изделия и спиральной протяжки.

Этому соотношению ε_5 соответствует схема резания на фиг. 65. Точка M режущего лезвия спиральной протяжки, перекатываясь по часовой стрелке вместе с подвижной полоидной окружностью радиуса a_0 по наружной стороне неподвижной полоидной окружности радиуса b_0 , вступает в контакт с обрабатываемым изделием и начинает процесс резания в начальной точке H . За время, пока точка M режущего лезвия спиральной протяжки в относительном своем движении совершит весь путь своего контакта с обрабатываемым изделием и придет в конечную точку K , подвижная полоидная окружность радиуса a_0 успеет совершить некоторое количество полных оборотов вокруг малой, неподвижной, полоидной окружности радиуса b_0 , отнесенной к изделию.

Вследствие этого траектория относительного рабочего движения точки M режущего лезвия спиральной протяжки представляет собой спираль, приближающуюся с неравномерно замедляющейся скоростью к круговым образующим обрабатываемого изделия радиуса r .

Толщина a m слоя металла, срезаемого с поверхности изделия в виде тонкой стружки, равна разности расстояний точки M до центра O_u за один оборот изделия, или, что то же самое, равна скорости приближения точки M к центру O_u за один оборот изделия.

В конечный момент процесса резания рассматриваемая точка M режущего лезвия коснется круговой образующей изделия радиуса r в точке K , лежащей одновременно и на прямой, соединяющей центры O_p и O_u .

Отношение $\varepsilon_5 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} = \frac{v}{s}$, удовлетворяющее определенным конкретным условиям практического применения метода протягивания тел вращения спиральными протяжками, достигается установлением надлежащих абсолютных размеров и соотношения радиусов a_0 и b_0 полоидных окружностей. Для этого рассмотрим схему (фиг. 65) в разрезе реально осуществляемых движений.

Протяжка радиуса R вращается вокруг оси O_p по часовой стрелке. В том же направлении вращается заготовка обрабатываемого изделия радиуса r_0 вокруг оси O_u . Положим, что протяжка повернулась на угол ω . Тогда точка M ее режущего лезвия переместилась по окружности радиуса R на величину $v_{пр}$. В относительном движении на тот же угол повернулась подвижная полоидная окружность и перекатилась без скольжения по наружной стороне неподвижной полоидной окружности на величину

$$a_0 \omega = b_0 \tau,$$

где τ — угол перекачивания подвижной полоиды радиуса a_0 . Отсюда имеем

$$\omega = \frac{b_0}{a_0} \tau, \text{ или } \frac{\tau}{\omega} = \frac{a_0}{b_0}.$$

Так как в действительности обрабатываемое изделие вращается, то при угле поворота τ ее окружная скорость

$$v_{изд} = r\tau,$$

а протяжки

$$v_{пр} = R\omega.$$

Подставив в отношение $\varepsilon_5 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}}$ значения $v_{изд}$ и $v_{пр}$, имеем

$$\varepsilon_5 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} = \frac{r}{R} \cdot \frac{\tau}{\omega} = \frac{r}{R} \cdot \frac{a_0}{b_0}. \quad (96)$$

Передаточное число вращения изделия и протяжки

$$i = \frac{a_0}{b_0} = \frac{R}{r} \cdot \frac{v}{s}. \quad (97)$$

Из схемы (фиг. 65) следует, что

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= R + r + b_0; \\ b_0 &= a_0 - (R + r). \end{aligned} \right\} \quad (98)$$

Решив совместно уравнения (96) и (98), находим математические выражения для вычисления по ним абсолютных величин радиусов полоидных окружностей:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{r(R+r)}{\varepsilon_5 R - r}; \\ a_0 &= \frac{\varepsilon_5 R(R+r)}{\varepsilon_5 R - r}. \end{aligned} \right\} \quad (99)$$

Так как радиус изделия r представляет собой весьма малую величину по сравнению с произведением $\varepsilon_5 R$, то, отбросив r , получаем

$$a_0 \approx R + r.$$

Значения средних величин основных кинематических параметров, характеризующих реальные условия работы спиральных протяжек, определяются цифровыми данными, приведенными в табл. 11 и вычисленными по уравнениям (96), (97), (99).

Из табл. 11 видно, что при протягивании тел вращения спиральными протяжками соотношения $\varepsilon_5 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}}$ должны быть весьма большими — порядка $1\,000 \div 12\,000$. Для получения подобных соотношений окружных скоростей вращения изделия и протяжки необходимо, чтобы радиусы неподвижных полоидных окружностей были бы очень малы — порядка всего лишь $b_0 = 0,002 - 0,04$ мм, а соответствующие радиусы подвижных полоидных окружностей — порядка $a_0 = 50 \div 150$ мм. При величинах радиусов полоидных окружностей этого порядка передаточные числа враще-

R в мм	50				75	100			
r в мм	10				25	50			
s в мм/об	0,05		0,30		0,15	0,05		0,30	
v м/мин	50	100	50	100	75	50	100	50	100
ε_5	6 300		1045		3150	12 600		2100	
i	31 500		5225		9450	25 200		4200	
b_0 в мм	0,00191		0,0114		0,0159	0,00595		0,0356	
α_0 в мм	60				100	150			

ния протягиваемого изделия и спиральной протяжки достигают значений порядка $i = 4\,000 \div 32\,000$. Число оборотов, совершаемых изделием за период рабочего цикла точки M режущего лезвия спиральной протяжки, и толщина a_z мм за каждый оборот зависят от выбранного соотношения

$$\varepsilon_s = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} = \frac{v}{s} = \frac{r}{R} \cdot \frac{a_0}{b_0} = i \frac{r}{R}. \quad (96)$$

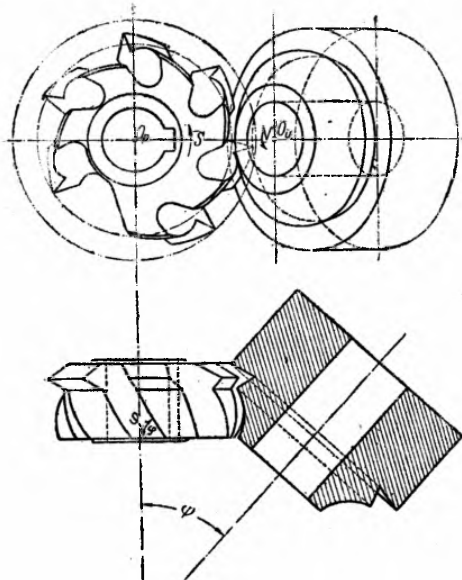
При наличии на спиральных протяжках прямых зубьев, расположенных параллельно оси ее вращения, все точки режущего лезвия каждого зуба начнут и кончат процесс резания одновременно или почти одновременно.

С точки зрения динамической загрузки инструмента и изделия, а также условий образования и отвода стружки, подобные условия работы являются невыгодными. В интересах плавности процесса работы целесообразно иметь винтообразно расположенные зубья, касательная к которым образует с вектором скорости резания v угол φ или с перпендикуляром к этому вектору угол λ . Тогда условия работы винтообразно расположенных зубьев будут почти аналогичны таковым для тангенциальных резцов или плоских протяжек с наклонным зубом, применяемых для протягивания тел вращения.

Некоторое сходство схем резания тангенциальными фасонными резцами и протягивания тел вращения как плоскими, так и спиральными протяжками дает основание придерживаться точки зрения, что в основу зубьев и тех и других протяжек положен тангенциальный резец. Это сходство распространяется также на характеристику образования и качества обработанной поверхности. Поверхность, протянутая спиральными протяжками с теоретической точки зрения не будет совершенно гладкой и ровной, а в осевом сечении будет иметь слегка волнообразную профильную линию, состоящую из сопряженных отрезков однополых гипербол, кривизна и расстояние между точками сопряжения которых определяют степень шероховатости

обработанной поверхности. Следует, однако, отметить, что эта кривизна и волнообразность чрезвычайно ничтожны, лежат в пределах до 0,002 мм и поэтому обработанная протягиванием поверхность изделия может быть охарактеризована как технически совершенно гладкая и ровная.

Спиральные протяжки, полностью сохраняя все преимущества плоских протяжек перед другими инструментами, обладают еще тем положительным свойством, что не требуют непроизводительной траты времени на совершение обратных холостых ходов. Благодаря круглой форме и вращательному движению подачи



Фиг. 66.

по окончании каждого рабочего цикла спиральная протяжка занимает исходное положение, позволяющее немедленно начать следующий очередной рабочий цикл.

Помимо этого ценным преимуществом спиральных протяжек является возможность значительно упростить кинематическую схему и сократить габариты протяжного станка.

Кроме того, спиральными протяжками можно производить протягивание поднутренных поверхностей на телах вращения (фиг. 66). В этом случае принципиальная кинематическая схема ре-

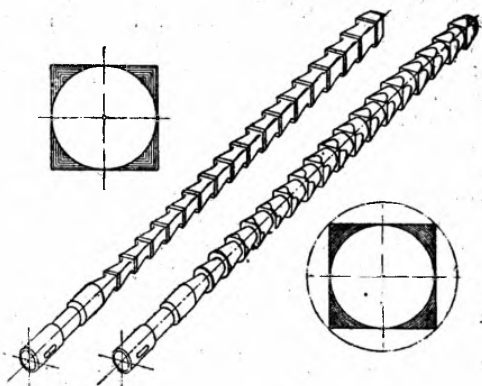
зания 501 переходит в схему 502. Протяжка и изделие, сохраняя соотношение $\varepsilon_6 = \frac{v_{изд}}{v_{пр}} = 1000 \div 12000$, имеют оси вращения, пересекающиеся под углом ψ . В соответствии с этим траекториями относительного рабочего движения являются пространственные спирали, приближающиеся, подобно перициклоиде, с неравномерно замедляющейся скоростью к круговым образующим обрабатываемого изделия.

§ 3. ГЕНЕРАТОРНЫЙ МЕТОД ПРОТЯГИВАНИЯ ФАСОННЫХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКИМИ И СПИРАЛЬНЫМИ ПРОТЯЖКАМИ

Отверстия и наружные поверхности фасонного профиля могут быть обработаны либо профильным, либо генераторным методом протягивания. При профильном методе режущие зубья

протяжек, начиная от первого и кончая последним, имеют фасонные режущие лезвия, профиль которых подобен заданному профилю протягиваемой фасонной детали. При генераторном методе протягивания режущие зубья протяжек срезают подлежащий удалению объем металла с заготовок изделия тонкими параллельными слоями и фасонный профиль на обрабатываемом изделии воспроизводится постепенно, в результате работы последовательно вступающих в резание вспомогательных режущих лезвий на боковых профильных сторонах всех рабочих зубьев.

Для случая протягивания замкнутого отверстия квадратного сечения профильный



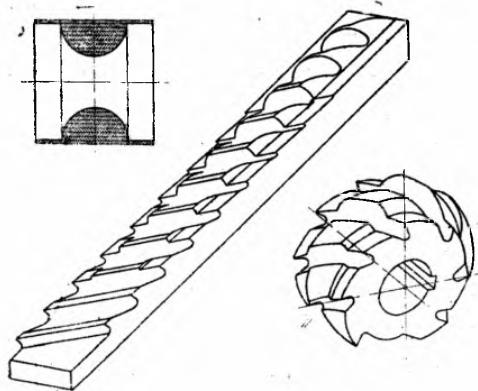
Фиг. 67.

тип протяжки и соответствующая ему схема резания показаны в левой части, а генераторный тип протяжки и соответствующая ему схема резания — в правой части фиг. 67.

Изготовление протяжек генераторного типа и их переточка в процессе эксплуатации сопряжены с меньшими технологическими трудностями по сравнению с профильными протяжками.

Эти положительные качества протяжек генераторного типа особенно ценны при изготовлении спиральных протяжек и их последующих переточках.

Затыловка или иной способ заточки задних углов на профильных режущих зубьях, расположенных наклонно под углом φ к вектору v окружной скорости вращения протяжки и расположенных к тому же на разном расстоянии от оси вращения, представляет исключительные технологические трудности.



Фиг. 68.

Процесс изготовления генераторных спиральных протяжек значительно проще. В этом случае вершина профильной части каждого зуба (фиг. 68) срезана по цилиндрической поверхности. Срезанная часть образует на каждом зубе главное режущее лезвие, располагающееся на спиральных протяжках по винтовой линии так же, как на цилиндрических фрезах с винтовым зубом. В отличие от последних главное режущее лезвие каждого последующего зуба протяжки несколько короче (а может быть и длиннее) и имеет радиус больше, чем радиус предыдущего зуба, на толщину срезаемого слоя a_z мм. Это позволяет производить заточку передних и задних поверхностей зубьев генераторных спиральных протяжек на универсально-заточных станках так же, как заточку цилиндрических фрез.

Нужная величина задних углов и сохранность фасонного профиля после всех последних переточек боковых вспомогательных режущих лезвий могут быть достигнуты обычным методом затылования, как это делается, например, на модульных червячных фрезах.

Применение генераторного метода позволяет значительно упростить технологию производства и переточки спиральных протяжек. Этот метод заменяет сложную схему профильного резания простой генераторной схемой обработки винтовыми главными режущими лезвиями рабочих зубьев ряда последовательно заменяющих друг друга цилиндрических поверхностей, пока вспомогательные режущие лезвия последнего рабочего и фасонные профильные лезвия калибрующих зубьев не замкнут готовый фасонный профиль окончательно обработанной детали.

§ 4. ТОЛЩИНА СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКИМИ ПРОТЯЖКАМИ

Для определения толщины a_z стружки, срезаемой на протяжении рабочего хода произвольной точкой режущего зуба плоской протяжки, рассмотрим фиг. 69. Очередной зуб протяжки, перемещаясь с равномерной скоростью справа налево, произвольной точкой M своего режущего лезвия вступает в контакт с обрабатываемой поверхностью изделия радиуса R и начинает процесс резания в точке H . На пути дальнейшего движения точки M изделие перемещается за каждый оборот влево на величину подачи s мм/об и срезает с поверхности вращающегося изделия стружку толщиной a мм. Наружный радиус изделия R за каждый оборот последнего уменьшается на толщину срезаемой стружки a мм и может быть выражен как переменный радиус-вектор ρ . В конечный момент резания, когда точка M режущего лезвия пересекает ось y в точке K , величина радиуса-вектора ρ достигает своего минимума и равна радиусу r обработанной поверхности. Суммарная толщина слоя, срезаемого точкой M за весь ее рабочий ход от точки H до точки K , представляет собой глубину резания текущего зуба протяжки

$$t = R - r.$$

Текущая координата x точки M движущегося режущего лезвия достигает максимума

$$x_{\max} = \sqrt{R^2 - r^2}$$

в момент, когда точка M , вступая в процесс резания, находится в положении точки H . Минимум координаты

$$x_{\min} = 0$$

соответствует конечному моменту резания, когда точка M находится в положении точки K .

Из фиг. 69 следует, что в любой момент уравнение

$$x^2 + r^2 = \rho^2 \quad (100)$$

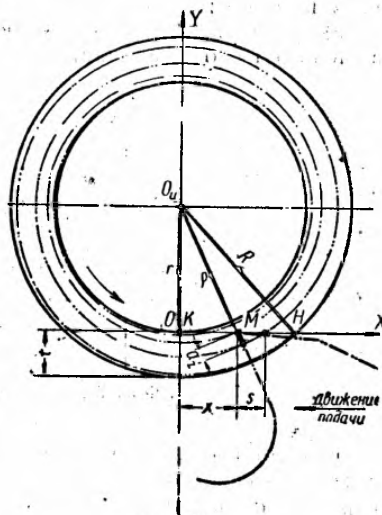
действительно.

Скорость приближения точки M режущего лезвия протяжки к центру O_a вращения изделия есть первая производная $\frac{d\rho}{dt}$, равная толщине срезаемой стружки a . Скорость горизонтального перемещения вдоль оси абсцисс есть первая производная $\frac{dx}{dt}$, равная подаче s мм/об изделия. Дифференцируя уравнение (100) по времени, получим

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{x}{\rho} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (101)$$

Так как $\frac{MM'}{MM} = \frac{MM'}{MM}$

$$\frac{dx}{dt} = s \text{ мм/об и } \frac{d\rho}{dt} = a \text{ мм,}$$



Фиг. 69.

то, заменив значения производных в уравнении (101), имеем

$$a = \frac{x}{\rho} s. \quad \text{мм} = \frac{\text{мм}}{\text{мм/об}} \cdot \frac{\text{мм/об}}{\text{об.}} \quad (102)$$

Из уравнения (100) следует, что

$$\rho = \sqrt{x^2 + r^2}.$$

Исключив из уравнения (102) радиус-вектор ρ , получим

$$a = \frac{xs}{\sqrt{x^2 + r^2}} = \frac{s}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{x}\right)^2}} \quad (103)$$

В соответствии с ранее сказанным, текущий радиус-вектор

$$\rho = R - \frac{xs}{\sqrt{x^2 + r^2}}.$$

Максимальное значение координаты $x_{\max}$ находится в прямой зависимости от глубины резания t текущего зуба протяжки. Из фиг. 69 имеем

$$(R - t)^2 + x_{\max}^2 = R^2,$$

или

$$x_{\max} = \sqrt{t(2R - t)}. \quad (104)$$

Уравнение (103) является основным для определения толщины стружки a при протягивании цилиндрических тел плоскими протяжками.

Анализируя уравнения (103) и (104), можно прийти к следующим выводам:

а) толщина стружки находится в прямой пропорциональной зависимости от величины подачи s и в обратной степенной

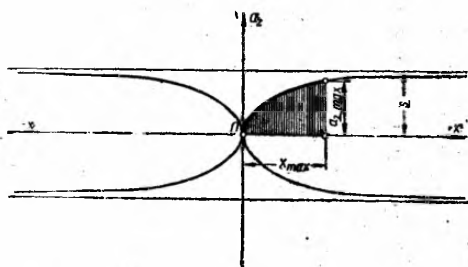
зависимости от радиуса r обработанной цилиндрической поверхности;

б) с увеличением глубины резания увеличивается координата x , а так как согласно уравнению (103) толщина стружки a находится в прямой степенной зависимости от x , то при $x = x_{\max}$ она зависит и от глубины резания t ;

в) с ростом глубины резания t текущего зуба плоской протяжки и ее горизонтальной подачи s мм/об изделия толщина стружки a увеличивается и

г) с увеличением радиуса r обработанной цилиндрической поверхности толщина срезаемой стружки a уменьшается.

В каждом конкретном случае протягивания плоскими протяжками цилиндрических тел вращения такие параметры, как глубина резания t и подача s , принимают частные конкретные значения и на протяжении работы протяжки не меняются. Во время работы протяжки, по мере ее движения, изменяется лишь координата x . Рассматривая уравнение (103) как функцию одной переменной x , заключаем, что за рабочий ход точка M срезающей стружку переменной толщины. Максимальная толщина срезающей стружки в начальный момент резания, когда точка M находится в положении H . По мере ее движения от точки H по направлению к точке K координата x уменьшается, стремится к нулю и согласно уравнению (103) влечет за собой уменьшение a до нуля включительно. Закономерность уменьшения текущей толщины стружки a , как это следует из уравнения (103), графически показана на фиг. 70 и выражается параболой. Крайние пределы колебания толщины стружки по уравнению (103)



Фиг. 70.

при $x = 0$ $a_{\min} = 0$;
 при $x = \infty$ $a_{\max} = s$ мм.

Так как в практических условиях всегда

$$x < \infty,$$

то максимальные практически срезаемые толщины стружки

$$a_{\max} < s \text{ мм.}$$

§ 5. СЕЧЕНИЕ СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКИМИ ПРОТЯЖКАМИ

Уменьшение интегрального усилия резания, приложенного к режущему периметру, и обеспечение спокойной и плавной работы протяжек достигается применением протяжек с косыми зубьями. Наклон косых зубьев может быть определен либо углом λ , измеряемым между наклонным режущим лезвием и перпендикуляром к вектору скорости резания v , либо углом φ , измеряемым между режущим лезвием и вектором подачи s . Наклонное расположение зубьев и касательное к протягиваемому цилиндру радиуса R направление подачи s приводят к подобии схем резания тангенциальных фасонных резцов и плоских протяжек. Некоторое отличие схемы работы зубьев плоских генераторных протяжек от схемы работы тангенциального фасонного резца сводится лишь к упрощению, так как сложная фасонная форма режущего лезвия тангенциального фасонного резца заменяется прямолинейным режущим лезвием протяжки, а сложная фасонная форма обрабатываемого изделия — элементарной цилиндрической формой протягиваемой поверхности. На фиг. 71—74 показан ряд последовательных положений, занимаемых режущим лезвием протяжки в процессе резания. Первое положение (фиг. 71) соответствует началу резания, когда в точке H первая крайняя левая точка режущего лезвия протяжки вступает в контакт с обрабатываемой поверхностью изделия. С этого момента начинается процесс постепенного врезания режущего лезвия в металл изделия и соответствующее ему постепенное возрастание сечения стружки F мм². Врезание заканчивается в момент (фиг. 72), когда первая крайняя левая точка режущего лезвия достигает конечной точки K своего контакта с поверхностью изделия и в состоянии резания находится периметр HK режущего лезвия зуба протяжки. Вследствие наклонного положения зуба протяжки различные точки его режущего периметра HK находятся в различных стадиях резания и срезают стружку различной толщины a . Когда крайняя левая точка режущего лезвия совпадает с конечной точкой резания K , ее абсцисса $x=0$. Остальные точки режущего периметра, находясь в различных стадиях резания, имеют абсциссы $x > 0$

точках режущего периметра HK толщина стружки меняется в пределах

$$0 < a_s < a_{\max}$$

по закону параболы согласно уравнению (103).

По этой причине площадь сечения стружки, срезаемой в конечный момент врезания зуба протяжки, имеет непрерывно меняющуюся толщину a вдоль всего режущего периметра HK .

Для определения величины площади сечения стружки берем выражение ее элементарного сечения (фиг. 75)

$$dF = a dl. \quad (105)$$

Из расчетной схемы имеем

$$dl = \frac{dx}{\cos \varphi},$$

следовательно,

$$dF = a \frac{dx}{\cos \varphi}.$$

Подставив из уравнения (103) значение толщины стружки a , получим

$$dF = \frac{s}{\cos \varphi} \cdot \frac{xdx}{\sqrt{x^2 + r^2}}. \quad (106)$$

Полную площадь сечения стружки получим интегрированием уравнения (106) в пределах $x_{\min} = 0$ и $x_{\max} = \sqrt{R^2 - r^2}$

$$F = \frac{s}{\cos \varphi} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{xdx}{\sqrt{x^2 + r^2}}. \quad (107)$$

Интегрируя уравнение (107), получаем общий вид уравнения сечения стружки

$$F = \frac{s}{\cos \varphi} \left[\sqrt{R^2 - r^2} \left(\sqrt{r^2 + x_{\max}^2} - \sqrt{r^2 + x_{\min}^2} \right) \right]. \quad (108)$$

Подставив значение пределов, имеем

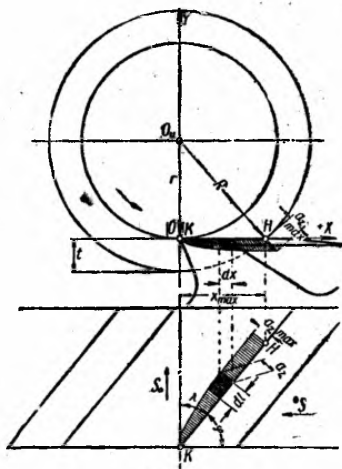
$$F = \frac{s}{\cos \varphi} \left[\sqrt{r^2 + R^2 - r^2} - \sqrt{r^2} \right] = \frac{s}{\cos \varphi} (R - r). \quad (109)$$

Но разность радиусов изделия до и после обработки

$$R - r = t$$

есть глубина резания, равная слою металла, срезаемого с поверхности изделия каждым зубом протяжки. Отсюда

$$F = \frac{st}{\cos \varphi} \text{ мм}^2. \quad (110)$$



Фиг. 75.

При направлении движения подачи протяжки перпендикулярно оси вращения изделия и вследствие наклонного расположения зуба протяжки его режущий периметр перемещается вдоль режущего лезвия. Это позволяет в уравнении (110) выразить поперечную подачу изделия s мм/об через продольную подачу изделия s_0 мм/об, пользуясь зависимостью

$$s = \frac{s_0}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (111)$$

Заменив s через s_0 , получим конечный вид уравнения площади сечения стружки при протягивании цилиндрических тел вращения плоскими протяжками

$$F = \frac{s_0 t}{\sin \varphi} \text{ мм}^2. \quad (112)$$

В уравнении (112) наклон зубьев протяжки выражен через угол φ , заключенный между наклонным режущим лезвием и вектором поперечной подачи s . Если выразить наклон зубьев протяжки через угол λ , измеряемый между наклонным режущим лезвием и перпендикуляром к вектору скорости v , то, как это видно на расчетной схеме (фиг. 71),

$$\varphi + \lambda = 90^\circ;$$

$$\sin \varphi = \cos \lambda.$$

Учитывая эту зависимость, можем выразить уравнение (112) так:

$$F = \frac{s_0 t}{\cos \lambda} \text{ мм}^2. \quad (113)$$

Дальнейший ход работы зуба протяжки в силу цилиндрической формы протягиваемого изделия характерен постоянством длины режущего периметра HK и значений абсцисс его конечных точек. На протяжении всей дальнейшей работы зуб протяжки срезает постоянное по площади сечение стружки F мм², определяемое уравнением (112) или (113). Это положение сохраняется до тех пор, пока точка H режущего периметра, перемещаясь вдоль режущего лезвия, не придет в его крайнюю противоположную точку (фиг. 73). С этого момента начинается постепенный выход точек режущего периметра из состояния резания, и сечение стружки F , постепенно уменьшаясь, достигает нулевого значения тогда, когда конечная точка режущего периметра приходит в крайнюю точку режущего лезвия. Процесс резания рассматриваемого зуба на этом заканчивается (фиг. 74).

§ 6. ТОЛЩИНА СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНЫМИ ПРОТЯЖКАМИ

Для определения толщины стружки, срезаемой на протяжении рабочего хода с поверхности изделия произвольной точкой M режущего лезвия зуба спиральной протяжки, рассмотрим фиг. 76.

Очередной зуб протяжки, вращаясь по часовой стрелке вокруг оси O_p с равномерной скоростью, произвольной точкой M своего режущего лезвия вступает в контакт с обрабатываемой поверхностью радиуса r и начинает процесс резания в точке H . За каждый оборот изделия точка M режущего лезвия перемещается по дуге окружности радиуса r на величину окружной подачи s мм/об и срезает с поверхности вращающегося изделия слой металла толщиной a мм в виде стружки. За каждый оборот изделия его радиус уменьшается на величину, равную толщине a срезанной стружки. В конечный момент резания, когда точка M режущего лезвия пересечет вертикальную осевую линию в точке K , радиус изделия R уменьшится на всю глубину резания t , срезаемую с поверхности изделия одним зубом протяжки. Радиус обработанной поверхности равен

$$r = R - t.$$

В любое мгновение работы точки M режущего лезвия зуба спиральной протяжки толщина a срезаемой ею стружки есть функция окружной подачи s мм/об изделия и угла φ , определяющего положение точки M на контактной дуге HK .

Для математического выражения этой функциональной зависимости напомним в выбранной системе координат уравнение изменения радиуса обрабатываемого цилиндра

$$z = \sqrt{x^2 + (L - y)^2} = \sqrt{x^2 + L^2 - 2Ly + y^2}. \quad (114)$$

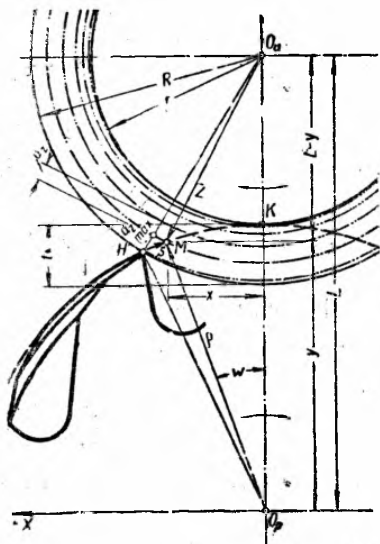
В уравнении (114) x и y — текущие координаты точки M режущего лезвия; L — расстояние между осями O_p и O_n вращения изделия и спиральной протяжки.

Уравнение окружности радиуса ρ , по которой движется точка M ,

$$\rho^2 = x^2 + y^2. \quad (115)$$

Подставив в уравнение (114) значение x , на основании уравнения (115) получим

$$z = \sqrt{\rho^2 + L^2 - 2Ly}. \quad (116)$$



Фиг. 76.

Уравнение скорости изменения радиуса изделия получаем дифференцированием уравнения (116) по времени

$$\frac{dz}{dt} = - \frac{L}{\sqrt{\rho^2 + L^2 - 2Ly}} \cdot \frac{dy}{dt}. \quad (117)$$

Уравнение (117), выражая зависимость скорости изменения радиуса z изделия по времени, тем самым выражает изменение толщины стружки по времени в зависимости от скорости изменения ординаты y режущей точки M .

Для определения толщины стружки a , срезаемой в любом положении режущей точки M , необходимо выразить

$$\frac{dz}{dt} = f \left(\frac{ds}{dt} \right),$$

т. е. как функцию от скорости движения режущей точки M по окружности радиуса ρ протяжки

$$\frac{ds}{dt} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2}. \quad (118)$$

Дифференцируя уравнение (115), имеем

$$2y \frac{dy}{dt} = - 2x \frac{dx}{dt},$$

откуда

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{y}{x} \cdot \frac{dy}{dt}.$$

Исключив из уравнения (118) $\frac{dx}{dt}$, получим

$$\frac{ds}{dt} = \sqrt{\frac{y^2}{x^2} \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} = \frac{dy}{dt} \sqrt{\frac{y^2 + x^2}{x^2}} = \frac{dy}{dt} \sqrt{\frac{\rho^2}{x^2}},$$

или

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\rho}{x} \cdot \frac{dy}{dt},$$

откуда

$$\frac{dy}{dt} = \frac{x}{\rho} \cdot \frac{ds}{dt}.$$

Из фиг. 76 следует

$$\frac{x}{\rho} = \sin \omega.$$

Тогда

$$\frac{dy}{dt} = \sin \omega \frac{ds}{dt}. \quad (119)$$

Подставив найденное по уравнению (119) значение $\frac{dy}{dt}$ в уравнение (117), получим

$$\frac{dz}{dt} = - \frac{L \sin \omega}{\sqrt{\rho^2 + L^2 - 2Ly}} \cdot \frac{ds}{dt}.$$

Делим и умножаем в подкоренном выражении последний член суммы на ρ

$$\frac{dz}{dt} = - \frac{L}{\sqrt{\rho^2 + L^2 - 2L \frac{y}{\rho} \rho}} \cdot \frac{ds}{dt} \quad (120)$$

Отношение

$$\frac{y}{\rho} = \cos \omega.$$

Следовательно, уравнение (120) примет вид

$$\frac{dz}{dt} = - \frac{L \sin \omega}{\sqrt{\rho^2 + L^2 - 2\rho L \cos \omega}} \cdot \frac{ds}{dt} \quad (121)$$

Уравнение (121) можно переписать в таком виде:

$$\frac{dz}{dt} = - \frac{L \sin \omega}{\sqrt{\rho^2 + L^2 - 2\rho L \cos \omega + 2\rho L - 2\rho L}} \cdot \frac{ds}{dt}$$

Тогда

$$\frac{dz}{dt} = - \frac{L \sin \omega}{\sqrt{(\rho L + L)^2 - 2L \rho (1 + \cos \omega)}} \cdot \frac{ds}{dt}$$

Заменяв скорость изменения радиуса изделия $\frac{dz}{dt}$ толщиной стружки a и скорость движения режущей точки M по окружности радиуса ρ окружной подачей s мм/об, получим основное уравнение толщины стружки, срезаемой при протягивании цилиндрических тел вращения спиральными протяжками,

$$a = \frac{s L \sin \omega}{\sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L (1 + \cos \omega)}} \quad (122)$$

Текущая длина радиуса обрабатываемого цилиндра получается из уравнения (122)

$$z = \sqrt{\rho^2 + L^2 - 2\rho L \cos \omega} = \sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L (1 + \cos \omega)} \quad (123)$$

Значение $\omega_{\max}$ может быть определено из уравнения (123), если предположить, что

$$z = R$$

и решить уравнение относительно $\cos \omega$

$$\cos \omega_{\max} = \frac{\rho^2 + L^2 - R^2}{2\rho L} \quad (124)$$

Текущий угол смещения

$$\omega = \frac{360 \cdot s}{2\pi \rho} \quad (125)$$

Анализируя уравнение (122), находим, что толщина стружки по длине контактной дуги HK изменяется в зависимости от положения на ней точки M режущего лезвия зуба протяжки, определяемого в свою очередь углом смещения ω . При $\omega = 0$ точка M занимает положение точки K и, согласно уравнению

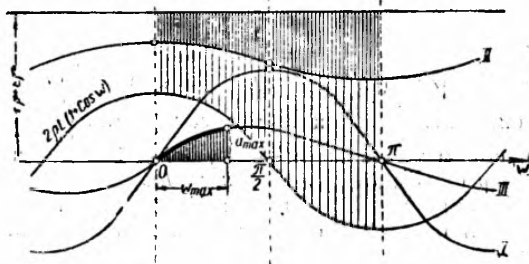
(122), толщина стружки a , срезаемой в этот момент, равна нулю. При $\omega_{\max}$ точка M занимает положение точки H и срезает максимальную толщину стружки $a_{\max}$. При средних положениях точки M угол смещения ω также занимает среднее положение

$$0 < \omega < \omega_{\max}$$

и соответственно

$$0 < a < a_{\max}$$

Изменение a в указанных пределах, как это вытекает из анализа уравнения (122), подчиняется синусоидальной закономерности. В этом уравнении, при любом угле смещения ω , величины s , l и ρ сохраняют постоянные значения. Поэтому числитель в уравнении (122), равный произведению $sl \sin \omega$, с изменением ω изменяется по закону синусоиды (фиг. 77, кривая I).



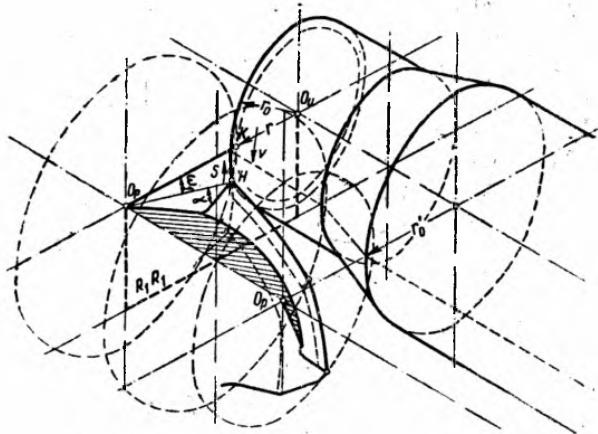
Фиг. 77.

Знаменатель уравнения, равный $\sqrt{(\rho+L)^2 - 2L\rho(1+\cos \omega)}$, изменяется по закону косинусоиды (фиг. 77, кривая II), смещенной на величину $\frac{\pi}{2}$. Кривая III (фиг. 77), ординаты которой равны частным от деления ординат кривой I на ординаты кривой II при одинаковых значениях углового смещения ω , представляет собой результирующую синусоиду. Она выражает в графической форме закономерность изменения толщины стружки a , срезаемой произвольной точкой M режущего лезвия зуба спиральной протяжки на пути ее движения, начиная от точки H и кончая точкой K . Так как предельное численное значение угла смещения $\omega_{\max}$ ограничено примерно $10 \div 15^\circ$, то реальным условиям резания соответствует не вся кривая синусоиды, а лишь небольшая ее часть в зоне, близкой к значениям $\omega=0$. На этом участке (фиг. 77) синусоида имеет весьма незначительную кривизну. Реальная закономерность изменения толщины стружки весьма близка к прямолинейной закономерности. Из сравнения закономерностей изменения толщины стружки a при протягивании цилиндрических поверхностей спиральными

и плоскими протяжками следует, что обе протяжки хотя и приводят к протягиванию цилиндрических поверхностей, в теоретическом освещении процессов резания не тождественны.

§ 7. СЕЧЕНИЕ СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНЫМИ ПРОТЯЖКАМИ

Процесс работы и последовательный ряд положений, занимаемых режущим лезвием спиральной протяжки при протягивании цилиндрических поверхностей, показаны на фиг. 78—82 и достаточно подробно описан в § 2. Так же как при протягивании плоскими протяжками, каждая точка режущего периметра



Фиг. 78.

винтового лезвия зуба спиральной протяжки срезает стружку различной толщины a . Крайняя левая точка режущего периметра, заканчивая свой рабочий ход (фиг. 79), находится в положении точки K и имеет $\omega = 0$ и $a = 0$; крайняя противоположная точка режущего периметра в это время находится в положении точки H и ей соответствуют угол смещения $\omega_{\max}$ и толщина стружки $a_{\max}$. Промежуточные точки режущего периметра, имея углы смещения ω в пределах

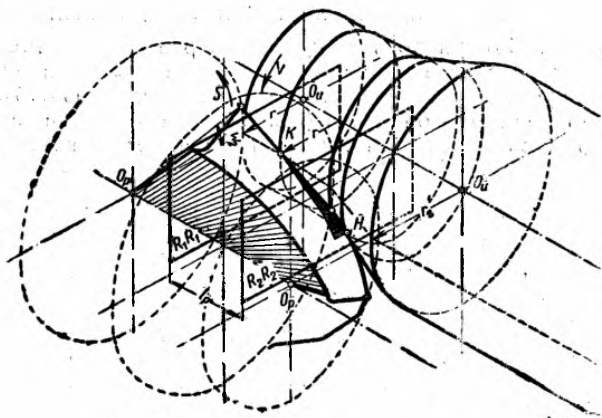
$$0 < \omega < \omega_{\max},$$

срезают соответственно своему положению на режущем периметре стружку толщиной

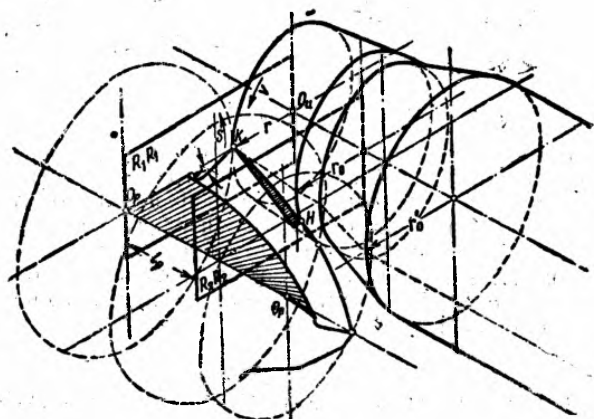
$$0 < a < a_{\max}.$$

Для определения площади сечения стружки F мм², срезаемой полностью врезавшимся зубом спиральной протяжки, составляем, руководствуясь фиг. 83, уравнение элементарного сечения стружки

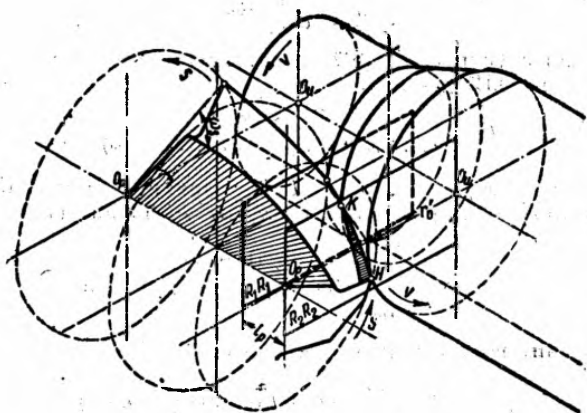
$$dF = a \, dl. \quad (126)$$



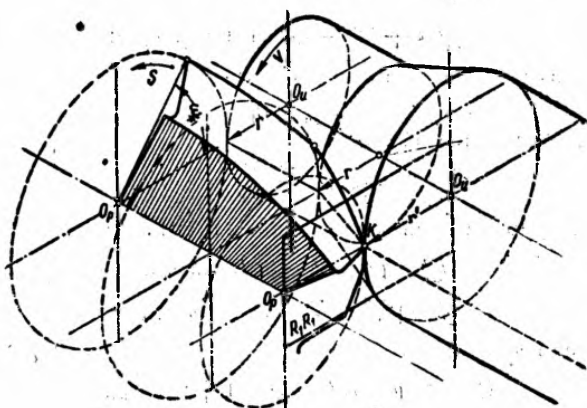
Фиг. 79.



Фиг. 80.



Фиг. 81.



Фиг. 82.

Из чертежа следует, что

$$dl = \rho \frac{d\omega}{\cos \varphi}.$$

Подставив в уравнение (126), получим

$$dF = \frac{a \rho}{\cos \varphi} d\omega. \quad (127)$$

Заменив в уравнении (127) толщину стружки a ее значением по уравнению (122), имеем

$$dF = \frac{s \rho L \sin \omega d\omega}{\cos \varphi \sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L (1 + \cos \omega)}}. \quad (128)$$

Площадь сечения стружки F , срезаемой одним зубом спиральной протяжки, равна интегралу от уравнения (128)

$$F = \frac{s \rho L}{\cos \varphi} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \frac{\sin \omega \cdot d\omega}{\sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L (1 + \cos \omega)}}. \quad (129)$$

После интегрирования уравнения (129) имеем

$$F = \frac{s \rho L}{\cos \varphi} \left[\frac{\sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L (1 + \cos \omega)}}{\rho L} \right]_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}}, \quad (130)$$

откуда общий вид уравнения сечения стружки

$$F = \frac{s}{\cos \varphi} \left[\sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L (1 + \cos \omega_{\max})} - \sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L (1 + \cos \omega_{\min})} \right]. \quad (131)$$

В условиях полного врезания

$$\omega_{\min} = 0;$$

тогда по уравнению (124):

$$\cos \omega_{\max} = \frac{\rho^2 + L^2 - R^2}{2\rho L}.$$

После преобразования уравнения (124) имеем:

$$R^2 = \rho^2 + L^2 - 2\rho L \cos \omega_{\max};$$

$$R = \sqrt{\rho^2 + L^2 - 2\rho L \cos \omega_{\max}}.$$

Согласно уравнению (121) имеем

$$R = \sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L (1 + \cos \omega_{\max})},$$

т. е. при $\omega_{\max}$ уменьшаемое, заключенное в квадратные скобки уравнения (131), равно радиусу R обрабатываемого цилиндра. Подставив значение $\omega_{\max}$ и $\omega_{\min}$, получим

$$F = \frac{s}{\cos \varphi} \left[\sqrt{R^2} - \sqrt{(\rho + L)^2 - 4\rho L} \right]. \quad (132)$$

Рассматривая в полученном уравнении (132) подкоренное выражение, находим, что

$$\rho^2 + 2\rho L + L^2 - 4\rho L = \rho^2 - 2\rho L + L^2 = (L - \rho)^2,$$

тогда

$$F = \frac{s}{\cos \varphi} [V \overline{R^2} - V \overline{(L - \rho)^2}]. \quad (133)$$

Из фиг. 83 следует, что

$$L - \rho = r.$$

Поэтому

$$F = \frac{s}{\cos \varphi} [V \overline{R^2} - V \overline{r^2}] = \frac{s(R - r)}{\cos \varphi}. \quad (134)$$

Далее из фиг. 83 видно, что

$$R - r = t.$$

Заменяя, получим

$$F = \frac{st}{\cos \varphi}. \quad (135)$$

Переходя от окружной подачи s к продольной подаче s_0 и пользуясь уравнением (111)

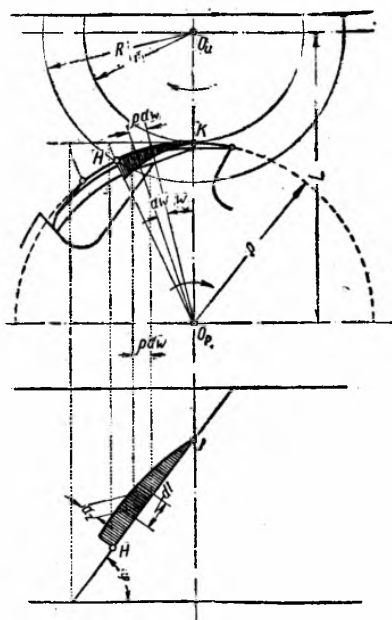
$$s = \frac{s_0}{\operatorname{tg} \varphi},$$

получим уравнение сечения стружки F при протягивании цилиндрических тел спиральными протяжками с винтовым зубом

$$F = \frac{s_0 t}{\sin \omega} \text{ мм}^2 \quad (136)$$

или, выражая наклон зубьев через угол λ (см. § 5),

$$F = \frac{s_0 t}{\cos \lambda} \text{ мм}^2. \quad (137)$$



Фиг. 83.

§ 8. СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА СРЕЗАНИЯ СТРУЖКИ ПРИ ТОЧЕНИИ И ПРОТЯГИВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ТОКАРНЫМИ РЕЗЦАМИ, ПЛОСКИМИ И СПИРАЛЬНЫМИ ПРОТЯЖКАМИ

В итоге вывода формул, выражающих поперечное сечение стружки F при протягивании цилиндрических тел вращения и приведенных в § 5 и 7, мы пришли к прямому тождеству уравнений (112) и (136), (113) и (137). Кроме того, эти уравнения не только тождественны между собой, но тождественны также и с общим уравнением сечения стружки при точении. Это может

иметь место лишь при наличии тождества процессов срезания стружки с поверхности обрабатываемого изделия токарным резцом и обеими сопоставляемыми конструкциями протяжек. Действительно, в обоих случаях протягивания, вследствие наклонного расположения режущего лезвия и равномерного дополнительного относительного движения изделия и инструмента, режущий периметр лезвия, срезав некоторый слой металла поперечного сечения F мм², скользят вдоль оси обрабатываемого цилиндра с продольной подачей s_0 мм/об изделия. Это приводит к тому, что в обоих случаях с поверхности обрабатываемого цилиндрического изделия в направлении винтового движения снимается сплошная лента стружки, как при работе обычным токарным резцом.

На протягиваемом изделии мы различаем, как и при точении, обрабатываемую поверхность, обработанную поверхность и винтовую поверхность резания. Таким образом, в отношении процесса срезания и удаления стружки и постоянства ее сечения на протяжении всего прохода каждого зуба процесс протягивания цилиндрических тел вращения плоскими и спиральными протяжками тождественен процессу срезания и отвода стружки при точении. Наряду с признаками сходства необходимо указать и на некоторые различия между этими методами обработки.

Вдоль режущего периметра зубьев протяжки толщина стружки a изменяется по закону параболы на плоских и по закону синусоиды на спиральных протяжках. На токарных же резцах с прямым режущим лезвием толщина стружки $a = \text{const}$ по всей длине режущего периметра. Здесь мы встречаемся со специфической особенностью процесса стружкообразования при протягивании тел вращения, причина которой заключается в принципе работы и кинематическом соотношении изделия и инструмента. Рассмотренное в § 2 последовательное преобразование метода фрезерования в метод протягивания тел вращения путем лишь количественного изменения в соотношениях скоростей вращения изделия и инструмента находит свое отражение в непрерывном изменении толщины стружки a вдоль режущего периметра зуба протяжки. Это служит признаком сходства метода протягивания тел вращения с методом фрезерования.

Отмеченные сходство и отличие служат критериями, дополняющими уже отмеченные в § 2 характерные особенности принципа работы протяжек. На этом основании представляется возможным выделить метод протягивания тел вращения в самостоятельный вид механической обработки деталей наряду с точением, фрезерованием, сверлением, строганием и пр.

§ 9. ТОЛЩИНА СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ КОНИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКИМИ ПРОТЯЖКАМИ

Тела вращения фасонной конфигурации можно протягивать как генераторными, так и профильными протяжками. Применение метода затылования задних профильных поверхностей на зубьях генераторных протяжек с целью образования доста-

точных по величине задних углов требует весьма точной заточки зубьев по передней их поверхности и контрольной проверки высоты каждого зуба. При любой ошибке в высоте зуба соответствующая ошибка окажется переданной на протягиваемую поверхность в результате чего обработанная поверхность может оказаться недостаточно гладкой и чистой и может возникнуть потребность в изготовлении на генераторных протяжках нескольких профильных режущих зубьев. Назначение этих зубьев заключается в срезании с уже протянутой фасонной поверхности изделия некоторого слоя металла с целью улучшить ее точность и качество.

В случае применения профильных и генераторных протяжек с зачистными профильными зубьями может возникнуть потребность в определении сечения стружки F , срезаемой этими зубьями. Величина сечения стружки зависит от конфигурации протягиваемого изделия; фасонных же профилей может быть бесконечно много. Поэтому формулы и приемы приближенного вычисления площади сечения стружки могут быть даны лишь для наиболее распространенных элементов фасонных профилей. Таковым в первую очередь является усеченный элементарный конус.

Пусть в некоторый произвольный момент работы профильного зуба плоской протяжки в непосредственном контакте с поверхностью резания протягиваемого конуса находится режущий периметр $НК$. Проекция режущего лезвия на плоскость, параллельную направлению продольной и поперечной подач s_0 и s , образует с вектором подачи s угол φ . Обозначим угол наклона образующих конуса через σ_0 . Из изложенного в § 4 и 6 следует, что в конечной точке резания K толщина стружки $a=0$, а в начальной точке H имеет максимальную величину $a_{\max}$. Определение толщины стружки a для любой промежуточной точки режущего лезвия возможно по основному уравнению (103), выведенному в § 4 для случая протягивания цилиндра призматическими протяжками. Необходимо иметь в виду, что в этом уравнении значение радиуса обработанной поверхности r переменнo, поэтому обозначим его через z . Текущий радиус z обрабатываемой конической поверхности меняет свою величину в соответствии с изменением координаты x точки режущего периметра.

Из расчетной схемы (фиг. 84) следует, что радиус

$$z = A - y. \quad (138)$$

Координата y связана с координатой x уравнением прямой

$$y = b - x \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (139)$$

Из фиг. 84 также следует, что

$$b = B \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (140)$$

Заменяя в уравнении (139) значение b выражением по уравнению (140) имеем

$$y = B \operatorname{tg} \varepsilon - x \operatorname{tg} \varepsilon = (B - x) \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (141)$$

Далее, заменив в уравнении (138) координату y ее выражением по уравнению (141) получим уравнение переменного радиуса z обрабатываемой конической поверхности

$$z = A - (B - x) \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (142)$$

Заменяя в основном уравнении (103) значение постоянного радиуса r протягиваемого цилиндра значением переменного радиуса r протягиваемой конической поверхности, получим уравнение толщины стружки при протягивании конических тел вращения плоскими протяжками

$$\alpha = \frac{xs}{\sqrt{x^2 + [A - (B - x) \operatorname{tg} \varepsilon]^2}} \text{ мм.} \quad (143)$$

Для определения неизвестного угла ε пишем

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{b}{B}. \quad (144)$$

Размер B определяет положение точки H и равен

$$B = \sqrt{2Rt - t^2}. \quad (145)$$

Из отношения

$$\frac{b}{R_0 - r_0} = \frac{l_x}{l_u}$$

находим

$$b = \frac{l_x}{l_u} (R_0 - r_0). \quad (146)$$

В уравнении (146) неизвестной величиной является l_x , которая может быть определена из равенства

$$\begin{aligned} R^2 &= (R - t)^2 + l_x^2 \operatorname{tg}^2 \varphi = \\ &= R^2 - 2Rt + t^2 + l_x^2 \operatorname{tg}^2 \varphi, \end{aligned}$$

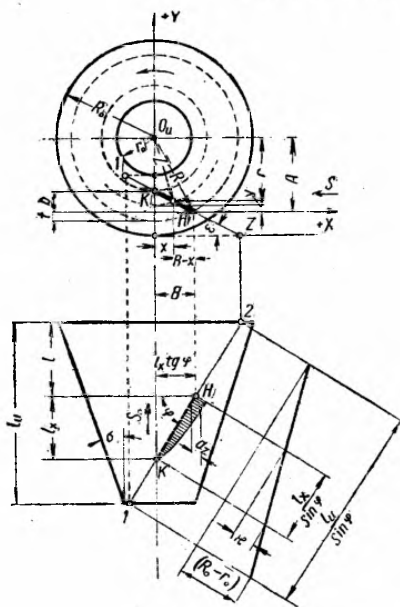
откуда

$$l_x^2 \operatorname{tg}^2 \varphi = 2Rt - t^2;$$

$$l_x = \frac{\sqrt{2Rt - t^2}}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (147)$$

Заменяя в уравнении (146) l_x найденным значением

$$b = \frac{\sqrt{2Rt - t^2}}{l_u \operatorname{tg} \varphi} (R_0 - r_0), \quad (148)$$



Фиг. 81.

а в связи с уравнением (145)

$$b = \frac{B(R_0 - r_0)}{l_n \operatorname{tg} \varphi}. \quad (149)$$

Подставим найденное выражение b в уравнение (144)

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{R_0 - r_0}{l_n \operatorname{tg} \varphi}.$$

Но

$$\frac{R_0 - r_0}{l_n} = \operatorname{tg} \sigma_0.$$

Поэтому

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\operatorname{tg} \sigma_0}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad (150)$$

Подставив в уравнение (143) значение $\operatorname{tg} \varepsilon$ по уравнению (150) получим

$$a = \frac{xS}{\sqrt{x^2 + [A - (B - x) \frac{\operatorname{tg} \sigma_0}{\operatorname{tg} \varphi}]^2}}. \quad (151)$$

Учитывая, что

$$A = R - t \quad \text{и} \quad B = \sqrt{2Rt - t^2},$$

где R — текущий мгновенный радиус большего основания поверхности резания, а t — глубина резания, равная слою металла, срезаемого с поверхности конуса одним зубом протяжки, окончательно получаем

$$a = \frac{xS}{\sqrt{x^2 + \left[R - t - (\sqrt{2Rt - t^2} - x) \frac{\operatorname{tg} \sigma_0}{\operatorname{tg} \varphi} \right]^2}}. \quad (152)$$

§ 10. СЕЧЕНИЕ СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ КОНИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКИМИ ПРОТЯЖКАМИ

В отличие от условий протягивания цилиндрических поверхностей при обработке конических поверхностей профильными плоскими протяжками режущий периметр скользит вдоль прямолинейного лезвия зуба, оставаясь все время в плоскости, касательной к образующей протягиваемого конуса и составляющей с осью вращения конуса угол σ_0 . Это влечет за собой непрерывное изменение длины режущего периметра, который увеличивается по мере приближения к большому основанию конуса. С увеличением длины режущего периметра увеличивается и площадь поперечного сечения стружки F , срезаемой режущим периметром лезвия зуба протяжки. Возникающие в процессе протягивания усилия резания, загружающие инструмент, деталь и отдельные звенья станка, будут непременно расти по мере увеличения радиуса обрабатываемой конической поверхности. Длина режущего периметра характеризуется радиусами r и R оснований кониче-

ской поверхности резания. Для определения их взаимной связи находим на основании фиг. 85:

$$B = \sqrt{2Rt - t^2}; \quad (153)$$

$$\operatorname{tg} \sigma_0 = \frac{R - r - t}{l_x}. \quad (154)$$

Так как

$$l_x = B \operatorname{tg} \varphi,$$

то

$$R - r - t = B \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \sigma_0. \quad (155)$$

Возведя в квадрат, имеем

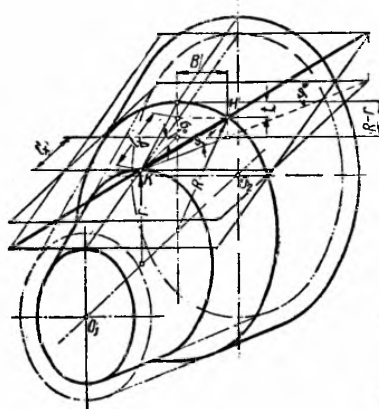
$$\begin{aligned} R^2 - 2rR - 2tR + r^2 + 2rt + t^2 &= B^2 \operatorname{tg}^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \sigma_0 = \\ &= 2Rt \operatorname{tg}^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \sigma_0 - t^2 \operatorname{tg}^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \sigma_0, \end{aligned}$$

или, преобразуя и приравнявая правую часть нулю,

$$R^2 - (2r + 2t + 2t \operatorname{tg}^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \sigma_0) R + (r^2 + t^2 + 2rt + t^2 \operatorname{tg}^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \sigma_0) = 0.$$

Решив полученное квадратное уравнение, получим

$$R = r + t + t \operatorname{tg}^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \sigma_0 + \operatorname{tg}^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \sigma_0 \sqrt{t^2 \operatorname{tg}^2 \varphi \operatorname{tg}^2 \sigma_0 + t^2 + 2rt}. \quad (156)$$



Фиг. 85.

Уравнение (156) позволяет определить радиус R большего основания поверхности резания при условии, что радиус r меньшего основания поверхности резания либо известен, либо заранее выбран. Решаем уравнение (154) относительно r , тогда

$$r = R - t - l_x \operatorname{tg} \sigma_0.$$

Подставляя вместо l_x его значение, напишем

$$r = R - t - B \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \sigma_0,$$

а в связи с уравнением (145)

$$r = R - t - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \sigma_0 \sqrt{2Rt - t^2}. \quad (157)$$

Полагая известными по уравнениям (156) и (157) радиусы r и R меньшего и большего оснований поверхности резания, составляем дифференциальное уравнение для определения площади поперечного сечения стружки F в произвольный момент резания.

Элементарное сечение стружки (фиг. 86)

$$dF = a \, dl, \quad (158)$$

но так как

$$dl = \frac{dx}{\cos \varphi},$$

$$dF = \frac{a dx}{\cos \varphi} \quad (159)$$

Заменив толщину стружки a ее выражением по уравнению (143), имеем

$$dF = \frac{sx dx}{\cos \varphi \sqrt{x^2 + [A - (B - x) \operatorname{tg} \varepsilon]^2}},$$

или

$$\begin{aligned} dF &= \frac{sx dx}{\cos \varphi \sqrt{x^2 + [A^2 - 2A(B - x) \operatorname{tg} \varepsilon + (B - x)^2 \operatorname{tg}^2 \varepsilon]}} = \\ &= \frac{sx dx}{\cos \varphi \sqrt{x^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon) + x(2A \operatorname{tg} \varepsilon - 2B \operatorname{tg}^2 \varepsilon) + (A - B \operatorname{tg} \varepsilon)^2}} = \\ &= \frac{sx dx}{\cos \varphi \sqrt{x^2 + x \left(\frac{2A \operatorname{tg} \varepsilon - 2B \operatorname{tg}^2 \varepsilon}{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon} \right) + \frac{(A - B \operatorname{tg} \varepsilon)^2}{1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon}}} = \\ &= \frac{sx dx}{\cos \varphi \sqrt{x^2 + x [2 \sin \varepsilon (A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon)] + (A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon)^2}}. \end{aligned}$$

Обозначим в подкоренном выражении:

$$a = 2 \sin \varepsilon (A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon);$$

$$b = (A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon)^2.$$

Тогда дифференциальное уравнение примет вид

$$dF = \frac{s \cos \varepsilon dx}{\cos \varphi \sqrt{x^2 + ax + b}} \quad (160)$$

Координаты x в соответствии с расчетной схемой могут меняться в пределах от $x_{\min} = 0$ до $x_{\max} = B = \sqrt{2Rt - t^2} = \frac{R - r - t}{\operatorname{tg} \varepsilon}$. Полное сечение стружки равно интегралу дифференциального уравнения (160)

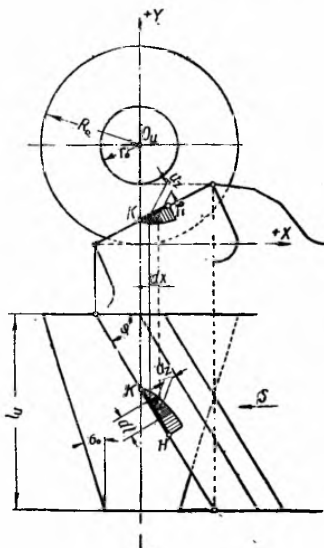
$$F = \frac{s \cos \varepsilon}{\cos \varphi} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{x dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}} \quad (161)$$

Чтобы подинтегральную функцию привести к виду, удобному для интегрирования, положим, что

$$x^2 + ax + b = v.$$

Тогда

$$(2x + a) dx = dv.$$



Фиг. 86.

Чтобы числитель подинтегральной функции содержал выражение

$$(2x - a) dx,$$

умножим и разделим подинтегральную функцию на 2 и прибавим и отнимем

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{a dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}}.$$

Тогда

$$F = \frac{s \cos \varepsilon}{2 \cos \varphi} \left[\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{2x dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}} + \right. \\ \left. + \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{a dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}} - \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{a dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}} \right],$$

откуда

$$F = \frac{s \cos \varepsilon}{2 \cos \varphi} \left[\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{(2x + a) dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}} - \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{a dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}} \right]. \quad (162)$$

Применяя подстановку Эйлера ко второму интегралу, являющемуся вычитаемым в уравнении (162), представим знаменатель

$$\sqrt{x^2 + ax + b} = z - x, \quad (163)$$

или, возводя в квадрат,

$$x^2 + ax + b = z^2 - 2zx + x^2,$$

откуда

$$x(a + 2z) = z^2 - b;$$

$$x = \frac{z^2 - b}{a + 2z}. \quad (164)$$

Дифференцируем

$$dx = \frac{2z(a + 2z) - 2(z^2 - b)}{(a + 2z)^2} dz = \frac{2az + 4z^2 - 2z^2 + 2b}{(a + 2z)^2} dz$$

и находим

$$dx = \frac{2(az + z^2 + b) dz}{(a + 2z)^2}. \quad (165)$$

Возвращаясь к уравнению

$$\sqrt{x^2 + ax + b} = z - x, \quad (163)$$

исключаем в первой части равенства координату x , заменив ее z по уравнению (164)

$$\sqrt{x^2 + ax + b} = z - x = z - \frac{z^2 - b}{a + 2z} = \\ = \frac{az + 2z^2 - z^2 + b}{a + 2z} = \frac{z^2 + az + b}{a + 2z}. \quad (166)$$

Заменив в подинтегральном выражении

$$\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{a \, dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}}$$

радикал его значением по уравнению (166) и dx его значением по уравнению (165), имеем

$$\begin{aligned} a \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}} &= a \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{2(az + z^2 + b)}{\frac{(a+2z)^2}{z^2 + az + b}} dz = \\ &= a \int_{\min}^{x_{\max}} \frac{2 \, dz}{a + 2z}. \end{aligned}$$

Если учесть произведенные преобразования, уравнение (162) сечения стружки примет вид

$$F = \frac{s \cos \varepsilon}{2 \cos \varphi} \left[\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{(2x + a) \, dx}{\sqrt{x^2 + ax + b}} - a \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{2 \, dz}{a + 2z} \right]. \quad (167)$$

Интегрируя уравнение (167), имеем

$$F = \frac{s \cos \varepsilon}{2 \cos \varphi} \left[2 \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sqrt{x^2 + ax + b} - a \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \ln(a + 2z) \right]. \quad (168)$$

Заменив теперь z исходной переменной x по уравнению (163), получим

$$\begin{aligned} F &= \frac{s \cos \varepsilon}{2 \cos \varphi} \left[2 \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sqrt{x^2 + ax + b} - a \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \ln(a + 2x + 2\sqrt{x^2 + ax + b}) \right] = \\ &= \frac{s \cos \varepsilon}{2 \cos \varphi} \left[2 \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sqrt{x^2 + ax + b} - a \ln(a + 2x + 2\sqrt{x^2 + ax + b}) \right]. \end{aligned}$$

Произведя подстановку предельных значений

$$x_{\min} = 0, \quad x_{\max} = B = \frac{R - r - t}{\operatorname{tg} \varepsilon},$$

имеем

$$\begin{aligned} F &= \frac{s \cos \varepsilon}{2 \cos \varphi} \left[2 \sqrt{B^2 + aB + b} - 2\sqrt{b} + \right. \\ &\quad \left. + a \ln \left(\frac{a + 2\sqrt{b}}{a + 2B + 2\sqrt{B^2 + aB + b}} \right) \right]. \quad (169) \end{aligned}$$

Рассматривая отдельно подкоренное выражение $\sqrt{B^2 + aB + b}$ и заменив a и b их значениями, получаем

$$\sqrt{B^2 + aB + b} = \sqrt{B^2 + 2B \sin \varepsilon (A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon) + (A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon)^2} = \cos \varepsilon \sqrt{A^2 + B^2}.$$

Но из фиг. 84 следует, что

$$A^2 + B^2 = R^2,$$

поэтому

$$\sqrt{B^2 + aB + b} = R \cos \varepsilon. \quad (170)$$

Заменив в уравнении (169) радикал его значением по уравнению (170), получим

$$F = \frac{s \cos \varepsilon}{\cos \varphi} \left[R \cos \varepsilon - A \cos \varepsilon + B \sin \varepsilon + a \ln \left(\frac{2 \sin \varepsilon (A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon) + 2 \sqrt{b}}{a + 2B + 2R \sin \varepsilon} \right) \right]. \quad (171)$$

Рассматривая отдельно первые слагаемые, заключенные в фигурную скобку, и заметив, что

$$A = R - t;$$

$$B = \frac{R - t - r}{\operatorname{tg} \varepsilon},$$

можем написать

$$R \cos \varepsilon - A \cos \varepsilon + B \sin \varepsilon = R \cos \varepsilon - (R - t) \cos \varepsilon + \frac{(R - t) \sin \varepsilon}{\operatorname{tg} \varepsilon} - r \frac{\sin \varepsilon}{\operatorname{tg} \varepsilon} = R \cos \varepsilon - (R - t) \cos \varepsilon + (R - t) \cos \varepsilon - r \cos \varepsilon = (R - r) \cos \varepsilon.$$

Заменив три первые слагаемые найденным выражением и заменив a его значением, получаем

$$F = \frac{s \cos \varepsilon}{\cos \varphi} \left\{ (R - r) \cos \varepsilon + 2 \sin \varepsilon (A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon) \ln \left[\frac{2 \sin \varepsilon (A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon) + 2 \sqrt{b}}{a + 2B + 2R \cos \varepsilon} \right] \right\}. \quad (172)$$

Рассматривая отдельно $A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon$, находим

$$A \cos \varepsilon - B \sin \varepsilon = (R - t) \cos \varepsilon - \frac{R - t - r}{\operatorname{tg} \varepsilon} \sin \varepsilon = (R - t) \cos \varepsilon - (R - t - r) \cos \varepsilon = r \cos \varepsilon.$$

Подставив в уравнение (172):

$$F = \frac{s \cos \varepsilon}{\cos \varphi} \left\{ (R - r) \cos \varepsilon + 2r \sin \varepsilon \cos \varepsilon \ln \left[\frac{r \sin \varepsilon \cos \varepsilon + r \cos \varepsilon}{r \sin \varepsilon \cos \varepsilon + B + R \cos \varepsilon} \right] \right\}. \quad (173)$$

Заменив

$$B = \frac{R - t - r}{\operatorname{tg} \varepsilon}$$

и произведя сокращение, получим

$$F = \frac{s \cos \varepsilon}{\cos \varphi} \left\{ (R - r) \cos \varepsilon + \right. \\ \left. + 2r \sin \varepsilon \cos \varepsilon \ln \left[\frac{r \cos \varepsilon (1 + \sin \varepsilon)}{r \sin \varepsilon \cos \varepsilon + R \cos \varepsilon + \frac{R}{\operatorname{tg} \varepsilon} \frac{t - r}{\operatorname{tg} \varepsilon}} \right] \right\} = \\ = \frac{s \cos^2 \varepsilon}{\cos \varphi} \left\{ R - r + 2r \sin \varepsilon \ln \left[\frac{r \cos \varepsilon (1 + \sin \varepsilon)}{R (1 + \sin \varepsilon) - t - r \cos^2 \varepsilon} \right] \right\}. \quad (174)$$

Переходя к десятичным логарифмам и заменяя поперечную подачу s протяжки продольной подачей s_0 согласно уравнению (111), получаем

$$F = \frac{s_0 \cos^2 \varepsilon}{\sin \varphi} \left\{ R - r + \right. \\ \left. + 2r \sin \varepsilon \cdot 2,3 \lg \left[\frac{r \sin \varepsilon (1 + \sin \varepsilon)}{R (1 + \sin \varepsilon) - t - r \cos^2 \varepsilon} \right] \right\} \text{ мм}^2. \quad (175)$$

Радиусы r и R оснований поверхности резания определяются по уравнениям (156) и (157), а величина угла ε — по уравнению (150).

Площадь поперечного сечения стружки F достигает максимального своего значения в момент, когда радиус R большего основания конической поверхности резания достигает величины радиуса R_0 большего основания протягиваемой конической поверхности.

§ 11. ТОЛЩИНА СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ КОНИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНЫМИ ПРОТЯЖКАМИ

Траектория относительного рабочего движения любой точки M режущего лезвия зуба спиральной протяжки определяется лишь направлением и соотношением скоростей относительного движения точек режущего лезвия инструмента и изделия и не зависит от формы режущего лезвия. Поэтому толщина стружки a , срезаемой с поверхности протягиваемого конического изделия в каждое мгновение работы точки M режущего лезвия зуба спиральной протяжки, определяется уравнением:

$$a = \frac{sL \sin \omega}{\sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L(1 + \cos \omega)}},$$

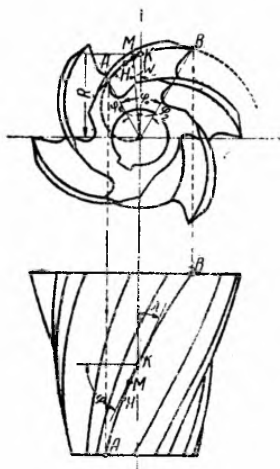
выведенным для случая протягивания цилиндрических поверхностей.

В отличие от условий обработки цилиндрических тел вращения при профильном протягивании конических тел вращения радиус-вектор ρ при перемещении его вдоль оси конуса изменяется в соответствии с углом конуса σ_0 .

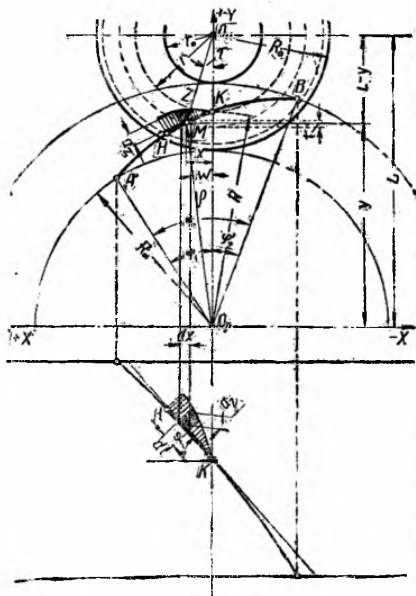
На спиральных протяжках с зубьями для профильного протягивания конических поверхностей режущие лезвия представляют собой винтовые спирали, лежащие на поверхности конуса. Проек-

цией винтовой спирали на основании конуса является архимедова спираль. Некоторая часть этой спирали, ограниченная точками AB , лежащими на основаниях усеченного конуса, представляющего тело спиральной протяжки, есть осевая проекция последней и может быть задана угловым параметром φ_0 . Положение точки K на ней может быть задано: а) частным значением радиуса вектора ρ ; б) угловым параметром φ_1 , составляющим часть общего углового параметра φ_0 (фиг. 87).

В рассматриваемый момент непосредственное резание осуществляется режущим периметром, представленным на осевой проекции отрезком HK проекции AB общего режущего лезвия. Положение произвольной точки M на режущем периметре может быть



Фиг. 87.



Фиг. 88.

определено текущим угловым параметром ω . В крайних положениях, когда точка M совпадает с конечной точкой резания K , текущий угловой параметр $\omega=0$. Когда точка M совпадает с начальной точкой резания H , текущий угловой параметр $\omega=\omega_{\max}$.

Для определения величины $\omega_{\max}$ обратимся к фиг. 88. Из схемы следует

$$L = \rho \cos \omega + z \cos \tau. \quad (176)$$

Чтобы исключить из уравнения (176) угол τ , пишем отношение

$$\frac{z}{\sin \omega} = \frac{\rho}{\sin \tau},$$

откуда

$$\sin \tau = \frac{\rho}{z} \sin \omega.$$

Возведем обе части равенства в квадрат

$$\sin^2 \tau = \frac{\rho^2}{z^2} \sin^2 \omega.$$

Помножив обе части равенства на -1 и прибавив к ним по $+1$, получим

$$1 - \sin^2 \tau = 1 - \frac{\rho^2}{z^2} \sin^2 \omega = \cos^2 \tau,$$

откуда

$$\cos \tau = \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{z^2} \sin^2 \omega}. \quad (177)$$

Подставив в уравнение (176) найденное значение τ , имеем

$$L = \rho \cos \omega + z \sqrt{1 - \frac{\rho^2}{z^2} \sin^2 \omega} = \rho \cos \omega + \sqrt{z^2 - \rho^2 \sin^2 \omega}, \quad (178)$$

но так как для произвольной точки винтовой спирали с шагом T

$$\rho = R - \frac{T\omega}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0;$$

$$z = r + \frac{T\omega}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 + t,$$

то уравнение (178) принимает вид

$$L = \left(R - \frac{T\omega}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right) \cos \omega + \sqrt{\left(r + \frac{T\omega}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 + t \right)^2 - \left(R - \frac{T\omega}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right)^2 \sin^2 \omega}. \quad (179)$$

Уравнение (179) не может быть решено относительно ω , поэтому определение величины $\omega_{\max}$ находится методом проб.

Уравнение архимедовой спирали, представляющей собой осевую проекцию винтовой спирали режущего лезвия зуба конической спиральной протяжки, имеет вид

$$\sigma = \frac{R}{2\pi} (2\pi - k\omega) = R \left(1 - \frac{k}{2\pi} \omega \right). \quad (180)$$

Уравнение (180) содержит неизвестный коэффициент k . Чтобы исключить его, переписываем уравнение (180) применительно к частному случаю, когда произвольная точка M совпадает с точкой A . Тогда

$$\rho = R_0; \quad \omega = \varphi_1$$

и уравнение (180) примет вид

$$R_0 = \frac{R}{2\pi} (2\pi - k\varphi_1) = R \left(1 - \frac{k}{2\pi} \varphi_1 \right).$$

Отсюда находим

$$\frac{k}{2\pi} = \left(1 - \frac{R_0}{R}\right) \frac{1}{\varphi_1}. \quad (181)$$

Подставив в уравнение (180) вместо $\frac{k}{2\pi}$ его значение, имеем

$$\rho = R \left[1 - \left(1 - \frac{R_0}{R}\right) \frac{\omega}{\varphi_1} \right] = R - (R - R_0) \frac{\omega}{\varphi_1}. \quad (182)$$

С изменением величины текущего углового параметра ω радиус-вектор ρ меняется по своей величине и, поворачиваясь против часовой стрелки вокруг полюсной точки O , одновременно перемещается также вдоль осей спиральной протяжки и протягиваемого конуса. Полагая начало отсчета углового поворота в точке k , имеем в этой точке

$$\omega = 0.$$

Полному обороту радиуса-вектора ρ вокруг оси O соответствует изменение ω на 2π и осевое перемещение на величину шага T винтовой спирали. Произвольному угловому повороту ω тогда будет соответствовать осевое перемещение

$$\frac{2\pi}{T} = \frac{\omega}{l_x},$$

отсюда

$$\omega = l_x \frac{2\pi}{T}. \quad (183)$$

или

$$l_x = \frac{\omega T}{2\pi}. \quad (184)$$

Исключив ω из уравнения (182), получим

$$\rho = R - (R - R_0) \frac{2\pi l_x}{\varphi_1 T}. \quad (185)$$

Из расчетной схемы (фиг. 88) следует, что

$$\rho = L - z + t, \quad (186)$$

где z — текущий радиус обрабатываемой конической поверхности. Из уравнений (185) и (186) можно написать равенство

$$L - z + t = R - (R - R_0) \frac{2\pi l_x}{\varphi_1 T}. \quad (187)$$

Текущий радиус z обрабатываемой конусной поверхности может быть выражен

$$z = r + l_x \operatorname{tg} \sigma_0 + t.$$

Исключив из уравнения (187) значение z , имеем

$$L - r - l_x \operatorname{tg} \sigma_0 - t + t = R - (R - R_0) \frac{2\pi l_x}{\varphi_1 T}. \quad (188)$$

Но так как

$$L - r = R,$$

то уравнение (188) примет вид

$$R - l_x \operatorname{tg} \sigma = R - \frac{2\pi l_x}{T_{\varphi_1}} (R - R_0), \quad (189)$$

откуда

$$\operatorname{tg} \sigma_0 = (R - R_0) \frac{2\pi}{T_{\varphi_1}}. \quad (190)$$

Величина шага T винтовой спирали определяется уравнением

$$T = l_u \frac{2\pi}{\varphi_0}. \quad (191)$$

Подставляя из уравнения (190) значение $\frac{2\pi}{T_{\varphi_1}} (R - r_0)$ в уравнение архимедовой спирали, имеем

$$\rho = R - l_x \operatorname{tg} \sigma_0, \quad (192)$$

или, заменив l_x его значением по уравнению (184),

$$\rho = R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0. \quad (193)$$

Подставив в основное уравнение (122) толщины стружки a значение радиуса-вектора ρ по уравнению (193), получим уравнение для определения толщины стружки a при протягивании конических тел вращения спиральными протяжками

$$a = \frac{sL \sin \omega}{\sqrt{\left(L + R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0\right)^2 - 2L(1 + \cos \omega) \left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0\right)}}. \quad (194)$$

Как видно из уравнения (194), толщина стружки $a_{\max}$ максимальна в начальной точке резания H при $\omega_{\max}$, определяемом в свою очередь по уравнению (179). Минимальная толщина стружки $a_{\min} = 0$ — в конечной точке резания K . Закономерность изменения толщины стружки a , срезаемой произвольной точкой M режущего лезвия зуба спиральной протяжки на пути ее рабочего движения, начиная от точки H и кончая точкой K , предопределена уравнением (194) и выражается синусоидальной кривой.

§ 12. СЕЧЕНИЕ СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ КОНИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНЫМИ ПРОТЯЖКАМИ

Профильные спиральные протяжки для протягивания конических поверхностей представляют собой конические тела, обратные по форме обрабатываемым коническим изделиям. Режущие лезвия зубьев таких протяжек изготавливаются методом фрезерования винтовых канавок. Канавки между зубьями можно фрезеровать на универсально-фрезерных станках (фиг. 89). Дисковая фреза повернута относительно оси конического тела протяжки

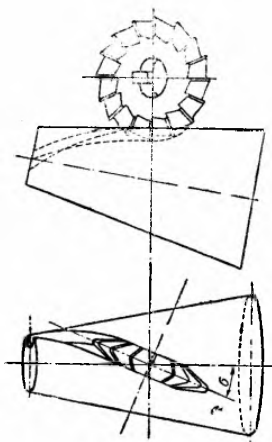
на некоторый угол σ . В соответствии с настройкой станка при выбранном шаге фрезеруемой спирали величина шага

$$T = \text{const}$$

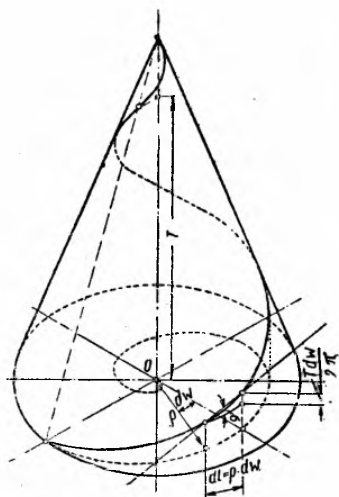
и при переменном радиусе конической поверхности

$$\rho = R - \frac{\omega T}{2\pi} \text{tg } \sigma_0. \quad (195)$$

Постоянство угла наклона винтовой спирали невозможно. Так, если фрезу повернуть на угол σ_1 , рассчитанный по некоторому радиусу R_1 конической поверхности спиральной протяжки, то по мере приближе-



Фиг. 89.



Фиг. 90.

ния фрезы к вершине конуса она должна менять угол поворота σ соответственно изменению радиуса R , что невозможно осуществить обычной кинематической настройкой. В результате этого дисковая фреза, сохраняя

$$\sigma_1 = \text{const},$$

подрежет края фрезеруемой канавки и расширит ее. Действительный угол σ окажется меньше теоретического для данного размера радиуса R и больше угла σ_1 установки фрезы по радиусу R_1 . К аналогичным результатам приведет и обратная установка на угол σ_2 , рассчитанный по меньшему радиусу R_2 конической поверхности протяжки при работе дисковой фрезы от вершины конуса в направлении его большего основания.

Угол подъема σ касательной к винтовой спирали может быть определен по фиг. 90. Рассматривая бесконечно малый отрезок

длины dl винтовой спирали, находим, что приращению углового параметра $d\omega$ соответствует приращение ординаты на

$$\frac{T}{2\pi} d\omega \quad (196)$$

и приращение проекции длины винтовой спирали на величину $\rho \cdot d\omega$.

Но так как радиус-вектор

$$\rho = R - \frac{T\omega}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0,$$

то

$$\rho d\omega = \left(R - \frac{T\omega}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right) d\omega. \quad (197)$$

Учитывая отношение приращения ординаты к приращению проекции винтовой спирали на основание конуса, имеем

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{\frac{T d\omega}{2\pi \left(R - \frac{T\omega}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right) d\omega}}{\frac{T}{2\pi R - T\omega \operatorname{tg} \sigma_0}}.$$

Переходя к измерению текущего углового параметра в градусах, имеем

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{T}{2\pi \left(R - \frac{T\omega^\circ}{360} \operatorname{tg} \sigma_0 \right)} \quad (198)$$

По уравнению (198) можно определить угол подъема σ касательной в любой точке к винтовой спирали, являющейся режущим лезвием на конической поверхности спиральной протяжки.

Если через ω_0 обозначить угол смещения крайних точек режущего лезвия, лежащих на торцах спиральной протяжки, то согласно уравнению (198) угол σ на длине этого режущего лезвия будет меняться соответственно изменению угла ω_0 . Установку фрезы, а впоследствии и шлифовального круга для обработки зуба протяжки следует делать для среднего значения угла σ и при угле смещения $\frac{\omega_0}{2}$. Тогда уравнение (198) примет вид

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{T}{2\pi \left(R - \frac{T\omega^\circ}{2 \cdot 360} \operatorname{tg} \sigma_0 \right)} \quad (199)$$

Например, пусть при $R = 60$ мм, $T = 216$ мм, $\sigma_0 = 15^\circ$ угол смещения крайних точек режущего лезвия, лежащих на противоположных торцах тела протяжки, $\omega_0 = 45^\circ$. Тогда по уравнению (199) угол установки фрезы

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{216}{6,28 \left(60 - \frac{216 \cdot 45}{2 \cdot 360} \cdot 0,2675 \right)} \approx 0,61.$$

$$\sigma \approx 31^\circ 30'.$$

Естественно, что, установив фрезу и шлифовальный круг на угол σ , вычисленный по уравнению (199), мы получим точное совпадение угла наклона профрезерованной канавки с результатами расчета лишь для средней точки режущего лезвия, угол смещения которой равен $\frac{\omega^\circ}{2}$. Для остальных же точек лезвия такого совпадения с расчетными данными не будет. Чтобы судить о возможных расхождениях, полезно рассмотреть конкретный пример: при $R=60$ мм; $T=216$ мм; $\sigma_0=15^\circ$

ω	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	π
δ	30°	32°	$34^\circ 25'$	40°

В практических условиях наиболее вероятный предельный угол смещения $\omega_0=45^\circ$. Ведя расчет по $\frac{\omega_0}{2}=22^\circ 30'$, мы имеем основания предполагать, что крайние отклонения действительности от теоретических расчетов лежат в пределах $\pm 1^\circ$. Это практически укладывается в пределы допусков при фрезеровании и шлифовании зубьев и, следовательно, каких-либо ощутимых вредных последствий иметь не может.

Для определения площади поперечного сечения стружки F мм², срезаемой с протягиваемой конической поверхности зубом профильной спиральной протяжки, составим дифференциальное уравнение. Из фиг. 88 следует, что

$$dF = a \, dl, \quad (200)$$

но

$$dl = \frac{\rho}{\cos \sigma} d\omega.$$

Заменив значение ρ по уравнению (195), получаем

$$dl = \frac{\left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right) d\omega}{\cos \sigma}. \quad (201)$$

Подставив в уравнение (200) значение a по уравнению (194) и значение dl по уравнению (201), имеем

$$dF = \frac{sL \left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right) \sin \omega \, d\omega}{\cos \sigma \sqrt{\left(L + R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right)^2 - 2L(1 + \cos \omega) \left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right)}}.$$

Полное сечение стружки F , снимаемой одним зубом протяжки, равно

$$F = \frac{sL}{\cos \sigma} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \frac{\left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right) \sin \omega \, d\omega}{\sqrt{\left(L + R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right)^2 - 2L(1 + \cos \omega) \left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0 \right)}}. \quad (202)$$

Уравнение (202) требует предварительного преобразования подинтегрального выражения с целью приведения его к виду интегрируемых функций.

Преобразования сложного подинтегрального выражения приводят к чрезмерно сложному выражению первообразной функции интеграла, требующему трудоемкой вычислительной работы при практическом использовании. Это делает нецелесообразным отыскание этой первообразной функции, поскольку с достаточной степенью точности определение площади поперечного сечения стружки может быть осуществлено методом приближенного вычисления определенных интегралов по формуле Симпсона.

Для этого представим, что ξ есть функция подинтегрального выражения по уравнению (202)

$$\xi = \frac{\left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0\right) \sin \omega}{\sqrt{\left(L + R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0\right)^2 - 2L(1 + \cos \omega) \left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0\right)}}. \quad (203)$$

Пользуясь формулой Симпсона, пишем

$$\begin{aligned} F &= \frac{s_0 L}{\sin \sigma} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \frac{\left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0\right) \sin \omega}{\sqrt{\left(L + R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0\right)^2 - 2L(1 + \cos \omega) \left(R - \frac{\omega T}{2\pi} \operatorname{tg} \sigma_0\right)}} d\omega = \\ &= \frac{s_0 L \omega_{\max}}{6 \sin \sigma \cdot n} \left[\xi_0 + 4\xi_{1/2} + 2\xi_1 + 4\xi_{1 1/2} + 2\xi_2 + \dots \right. \\ &\quad \left. \dots + 2\xi_{n-1} + 4\xi_{n-1/2} + \xi_n \right]. \end{aligned} \quad (204)$$

Определив по уравнению (179) значение $\omega_{\max}$, делим его на четное число n частей и, взяв между четными делениями ряд нечетных промежуточных делений, получаем ряд значений текущего углового параметра

$$\omega_0; \omega_{1/2}; \omega_1; \omega_{1 1/2}; \omega_2; \dots \omega_{n-1}; \omega_{n-1/2}; \omega_n.$$

Подставив эти частные значения угла смещения ω в уравнение (203), вычисляем соответственный ряд численных значений

$$\xi_0; \xi_{1/2}; \xi_1; \xi_{1 1/2}; \xi_2; \dots \xi_{n-1}; \xi_{n-1/2}; \xi_n.$$

Подставив вычисленные значения функции ξ в формулу Симпсона, выраженную правой частью уравнения (204), и производя необходимые математические действия, получаем приближенное значение площади поперечного сечения стружки F мм², срезаемой с поверхности протягиваемого конического изделия режущим периметром зуба профильных спиральных протяжек.

Пример 1. Необходимо определить площадь поперечного сечения стружки F мм², срезаемой с поверхности конического изделия режущим периметром зуба профильной спиральной про-

тяжки при условии, что: $R = 50 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$; $\sigma_0 = 20^\circ$; $T = 180 \text{ мм}$; $r = 25 \text{ мм}$; $L = 75 \text{ мм}$; $\omega_0 = 45^\circ$; $s_0 = 0,6 \text{ мм/об}$.

По уравнению (199) определяем угол подъема винтового спирального зуба спиральной протяжки

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{180}{6,28 \left(50 - \frac{180 \cdot 45}{720} \operatorname{tg} 20 \right)}; \sigma = 31^\circ 58'.$$

Угол $\omega_{\max}$ определяется методом подбора по уравнению (179)

$$75 = \left(50 - \frac{180 \omega}{6,28} 0,364 \right) \cos \omega + \sqrt{\left(25 + \frac{180 \omega}{6,28} 0,364 + 1 \right)^2 - \left(50 - \frac{180 \omega}{6,28} 0,364 \right)^2 \sin^2 \omega}.$$

Давая ω ряд частных значений, получаем:

Угол смещения ω . . .	5°	$7^\circ 30'$	9°	10°	$10^\circ 30'$
Правая сторона равенства	75,5	75,2	74,1	73,9	73,3
Отклонения от равенства	+1,5	+0,2	-0,9	-1,1	-1,7

Для расчета принимаем $\omega_{\max} = 8^\circ$.

Приняв в формуле Симпсона четное число $n = 4$, имеем следующие значения:

Значение текущего углового параметра b° в градусах	ω_0	$\omega_{1/2}$	ω_1	$\omega_{1^{1/2}}$	ω_2	$\omega_{2^{1/2}}$	ω_3	$\omega_{3^{1/2}}$	ω_4
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Значение под-интегральной функции	ξ_0	$\xi_{1/2}$	ξ_1	$\xi_{1^{1/2}}$	ξ_2	$\xi_{2^{1/2}}$	ξ_3	$\xi_{3^{1/2}}$	ξ_4
	0	0,0343	0,066	0,099	0,126	0,156	0,180	0,204	0,233

Подставив вычисленные значения ξ в формулу Симпсона по уравнению (204), имеем

$$F = \frac{75 \cdot 0,6 \cdot 6,28 \cdot 8}{0,515 \cdot 360 \cdot 6 \cdot 4} [0 + 4 \cdot 0,0343 + 2 \cdot 0,066 + 4 \cdot 0,099 + 2 \cdot 0,126 + 4 \cdot 0,156 + 2 \cdot 0,180 + 4 \cdot 0,204 + 0,233] = 1,44 \text{ мм}^2.$$

Пример 2. Для сопоставления, с какой точностью определяется площадь сечения стружки по формуле Симпсона, подсчитаем F для случая протягивания цилиндрической поверхности спиральными протяжками.

Пусть $\rho = 50 \text{ мм}$; $L = 75 \text{ мм}$; $\varphi = 31^\circ$; $R = 26 \text{ мм}$; $s_0 = 0,6 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$.

По уравнению (136) сечение стружки

$$F = \frac{0,6 \cdot 1}{0,575} = 1,17 \text{ мм}^2.$$

Для приближенного подсчета F по формуле Симпсона пишем уравнение сечения стружки (129)

$$F = \frac{s \rho L}{\cos \varphi} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \frac{\sin \omega d\omega}{\sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L(1 + \cos \omega)}}.$$

Учитывая уравнение (111), заменяем

$$s = \frac{s_0}{\operatorname{tg} \varphi}.$$

Тогда уравнение (129) примет вид

$$F = \frac{s_0 \rho L}{\sin \varphi} \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} \frac{\sin \omega d\omega}{\sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L(1 + \cos \omega)}}.$$

Угол $\omega_{\max}$ определяется по уравнению (124)

$$\cos \omega_{\max} = \frac{\rho^2 + L^2 - R^2}{2\rho L};$$

$$\cos \omega_{\max} = \frac{2500 + 5625 - 676}{2 \cdot 50 \cdot 75} = 0,9932;$$

$$\omega_{\max} = 6^\circ 40' = 400 \text{ сек.}$$

Приняв четное число $n = 4$ и

$$\xi = \frac{\sin \omega}{\sqrt{(\rho + L)^2 - 2\rho L(1 + \cos \omega)}},$$

получаем следующие значения:

Значение текущего углового параметра в градусах	ω_0	$\omega_{1/2}$	ω_1	$\omega_{1 1/2}$	ω_2	$\omega_{2 1/2}$	ω_3	$\omega_{3 1/2}$	ω_4
	0	$5/6$	$5/3$	$5/2$	$10/3$	$25/6$	5	$35/6$	$20/3$
Значение подинтегральной функции	ξ_0	$\xi_{1/2}$	ξ_1	$\xi_{1 1/2}$	ξ_2	$\xi_{2 1/2}$	ξ_3	$\xi_{3 1/2}$	ξ_4
	0	0,000585	0,00117	0,00175	0,002245	0,00291	0,00348	0,00406	0,00465

Подставив вычисленные значения ξ в формулу Симпсона,

$$F = \frac{0,6 \cdot 75 \cdot 60 \cdot 6,28 \cdot 640}{0,515 \cdot 360 \cdot 64} [0 + 4 \cdot 0,000585 + 2 \cdot 0,00117 + 4 \cdot 0,00175 + 2 \times \\ \times 0,002245 + 4 \cdot 0,00291 + 2 \cdot 0,00348 + 4 \cdot 0,00406 + \\ + 0,00466] = 1,17 \text{ мм}^2.$$

Следовательно, в пределах до 0,01 мм результат подсчета по приближенной формуле полностью совпадает с результатом подсчета по точному уравнению (136).

§ 13. ТОЛЩИНА a И СЕЧЕНИЕ F СТРУЖКИ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО ФАСОННОГО ПРОФИЛЯ

Помимо цилиндрических и конических поверхностей можно протягивать также тела вращения произвольного фасонного профиля.

Толщина a и сечение F стружки, срезаемой при этом, могут быть определены в каждом конкретном случае на основании следующего метода решения.

При протягивании тел вращения протяжке сообщается движение, касательное к протягиваемой поверхности. Вследствие этого профильные режущие лезвия зубьев протяжки на пути своего абсолютного движения образуют фасонную поверхность, касательную к фасонной поверхности изделия, протягиваемой этим же зубом. Уравнение этой поверхности

$$\Phi_1(x, y, z) = 0. \quad (205)$$

Передняя поверхность зуба протяжки выражается уравнением

$$\Phi_2(x, y, z) = 0. \quad (206)$$

Профильное режущее лезвие зуба протяжки образовано пересечением его передней плоскости или поверхности с фасонной поверхностью, касательной к обработанному этим зубом поверхности изделия. В силу этого уравнение линии профильного режущего лезвия в пространстве представлено уравнениями (205) и (206).

Исключая совместным решением уравнений (205) и (206) координату y , получаем уравнение проекции профильного режущего лезвия на плоскость XZ

$$\Phi_3(x, z) = 0. \quad (207)$$

Решая уравнение (207) относительно координаты z , имеем

$$z = f_1(x). \quad (208)$$

Заменив в основном уравнении толщины стружки

$$a = f_2(x, z) \quad (209)$$

переменную z переменной x по уравнению (208), получим функцию

$$a = f_0(x), \quad (210)$$

выражающую зависимость толщины стружки a от одной единственной переменной x .

При протягивании некоторых сложных контуров удобнее выразить уравнения (205) и (206) профильного режущего лезвия зуба протяжки в параметрической форме. Для перехода к пара-

метрической форме принимаем, что функциональная зависимость одной какой-либо переменной, например координаты z , от выбранного параметра τ известна, т. е.

$$z = z(\tau). \quad (211)$$

Исключив в уравнениях (205) и (206) по очереди переменные y и x , имеем:

$$\left. \begin{aligned} v &= f_3(z); \\ x &= f_4(z). \end{aligned} \right\} \quad (212)$$

Заменив в уравнении (212) переменную z параметром τ и пользуясь зависимостью по уравнению (211), получаем уравнения профильного режущего лезвия зуба протяжки в параметрической форме:

$$\left. \begin{aligned} x &= f(\tau); \\ y &= \psi(\tau); \\ z &= z(\tau). \end{aligned} \right\} \quad (213)$$

Заменив в основном уравнении (209) для толщины стружки координаты x и z параметром τ согласно уравнению (213), получаем

$$a = f_5(\tau), \quad (214)$$

выражающее зависимость толщины стружки как функцию параметра τ .

Для определения площади поперечного сечения стружки составляем дифференциальное уравнение

$$dF = a \, dl, \quad (215)$$

где dl — дифференциал дуги пространственного режущего лезвия зуба протяжки, который определяется уравнением

$$dl = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2} \quad (216)$$

Дифференцируя параметрические уравнения (213), имеем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= f'(\tau); \\ \frac{dy}{d\tau} &= \psi'(\tau); \\ \frac{dz}{d\tau} &= z'(\tau), \end{aligned} \right\} \quad (217)$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} dx &= f'(\tau) d\tau; \\ dy &= \psi'(\tau) d\tau; \\ dz &= z'(\tau) d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (218)$$

Заменив в уравнении (216) значения дифференциалов найденными соответствующими значениями по уравнению (218), получим

$$dl = \sqrt{[f'(\tau)]^2 + [\psi'(\tau)]^2 + [z'(\tau)]^2} d\tau. \quad (219)$$

Заменив в уравнении (215) значение толщины стружки a его выражением по уравнению (214) и значение дифференциала дуги его значением по уравнению (219), получим

$$dF = f_5(\tau) \sqrt{[f'(\tau)]^2 + [\psi'(\tau)]^2 + [\chi'(\tau)]^2} d\tau, \quad (220)$$

как функцию параметра τ .

Полное сечение F стружки, срезаемой профильным зубом протяжки, находим в результате интегрирования уравнения (220)

$$F = \int_{\tau_1}^{\tau_2} f_5(\tau) \sqrt{[f'(\tau)]^2 + [\psi'(\tau)]^2 + [\chi'(\tau)]^2} d\tau. \quad (221)$$

Для определения пределов определенного интеграла необходимо решить совместно уравнение

$$z = f_1(x)$$

проекции профильного режущего лезвия на плоскость XZ и уравнения поверхности вращения обрабатываемого изделия:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \beta; \\ y &= F(r); \\ z &= r \cos \beta + L. \end{aligned} \right\} \quad (222)$$

Исключая в уравнении (222) угловой параметр β , находим

$$z = f_6(x). \quad (223)$$

Заменив в уравнениях (208) и (223) координату z угловым параметром τ по уравнению (211) и оба уравнения относительно координаты x , получим:

из уравнения (208)

$$x = f_7(\tau); \quad (224)$$

из уравнения (223)

$$x = f_8(\tau). \quad (225)$$

Приравнявая правые части уравнений (224) и (225), можем определить общее для этих двух уравнений значение параметра, равное верхнему пределу τ_2 определенного интеграла по уравнению (221). В тех случаях, когда определить τ_2 аналитическим способом не представляется возможным, целесообразным методом определения τ_2 является графический способ решения уравнений (224) и (225). Значение параметра τ в точке пересечения обеих кривых, построенных по уравнениям (224) и (225), равно верхнему пределу τ_2 . Значение τ_1 нижнего предела в каждом случае определяется самостоятельно в зависимости от формы изделия.

В качестве конкретного примера рассмотрим определение толщины стружки a и площади сечения стружки F при протягивании полукруглой вогнутой поверхности вращения, образованной вращением вокруг оси EF дуги радиуса R_0 . Подобные конфигурации можно протягивать как генераторными протяж-

ками, содержащими в числе своих рабочих зубьев несколько зачистных профильных зубьев, так и чисто профильными протяжками.

Криволинейное режущее лезвие профильного зуба (фиг. 91) образовано пересечением плоскости заточки передней грани зуба протяжки с цилиндрической поверхностью радиуса R_0 , касательной к вогнутой поверхности обрабатываемого изделия и имеющей ось, совпадающую с осью OX пространственной координатной системы.

В общем виде уравнение плоскости в пространстве выражается уравнением

$$\frac{x}{A} + \frac{y}{B} + \frac{z}{C} = 1. \quad (226)$$

Помножив обе части равенства на A , получим

$$x + \frac{A}{B}y + \frac{A}{C}z = A. \quad (227)$$

Из расчетной схемы (фиг. 91) видно, что

$$\left. \begin{aligned} \frac{A}{B} &= \operatorname{ctg} \varphi; \\ \frac{A}{C} &= \operatorname{tg} \gamma; \\ A &= M + R_0 \operatorname{tg} \gamma. \end{aligned} \right\} \quad (228)$$

Заменяя в уравнении (227) значения $\frac{A}{B}$, $\frac{A}{C}$ и A их значениями по уравнению (228), получаем

$$x + y \operatorname{ctg} \varphi + z \operatorname{tg} \gamma = M + R_0 \operatorname{tg} \gamma, \quad (229)$$

т. е. уравнение плоскости передней грани зуба протяжки.

Уравнение поверхности цилиндра радиуса R_0 , ось которого совпадает с осью x , есть

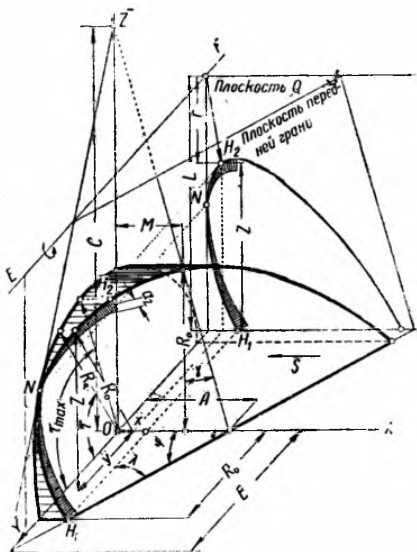
$$z^2 + y^2 = R_0^2. \quad (230)$$

Уравнение криволинейного режущего лезвия профильного зуба плоской протяжки находим совместным решением уравнений (229) и (230). Для этого решаем уравнение (230) относительно координаты y

$$y = \sqrt{R_0^2 - z^2},$$

и полученное выражение подставляем в уравнение (229) плоскости передней грани зуба протяжки. Получаем

$$x = M + R_0 \operatorname{tg} \gamma - z \operatorname{tg} \gamma - \operatorname{ctg} \varphi \sqrt{R_0^2 - z^2}. \quad (231)$$



Фиг. 91.

Уравнение (231) выражает проекцию режущего лезвия на плоскость, параллельную плоскости XZ . Неизвестной величиной в этом уравнении является расстояние M . Для определения M рассмотрим на фиг. 92 графическое изображение проекции криволинейного режущего лезвия зуба плоской протяжки на плоскости XZ . Из схемы видно, что координата z в точке N касания линии проекции зуба протяжки оси z может быть определена, если предположить, что

$$\frac{dx}{dz} = 0.$$

Дифференцируя уравнение (231), получаем

$$\frac{dx}{dz} = -\operatorname{tg} \gamma + \frac{z \operatorname{ctg} \varphi}{\sqrt{R_0^2 - z^2}} = 0,$$

откуда

$$z \operatorname{ctg} \varphi = \operatorname{tg} \gamma \sqrt{R_0^2 - z^2}. \quad (232)$$

Возводим обе части уравнения (232) в квадрат

$$z^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi = \operatorname{tg}^2 \gamma (R_0^2 - z^2) = R_0^2 \operatorname{tg}^2 \gamma - z^2 \operatorname{tg}^2 \gamma.$$

Решив относительно координаты z , получим

$$z = \frac{R_0 \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{ctg}^2 \varphi}}. \quad (233)$$

При $x=0$ уравнение (231) примет вид

$$M + R_0 \operatorname{tg} \gamma - z \operatorname{tg} \gamma - \operatorname{ctg} \varphi \sqrt{R_0^2 - z^2} = 0,$$

откуда

$$M = z \operatorname{tg} \gamma + \operatorname{ctg} \varphi \sqrt{R_0^2 - z^2} - R_0 \operatorname{tg} \gamma. \quad (234)$$

Подставляя значение координаты z по уравнению (233), имеем

$$\begin{aligned} M &= \frac{R_0 \operatorname{tg}^2 \gamma}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{ctg}^2 \varphi}} + \operatorname{ctg} \varphi \sqrt{R_0^2 + \frac{R_0^2 \operatorname{tg}^2 \gamma}{\operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{ctg}^2 \varphi}} - R_0 \operatorname{tg} \gamma = \\ &= R_0 \left[\frac{\operatorname{tg}^2 \gamma - \operatorname{ctg}^2 \varphi}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{ctg}^2 \varphi}} - \operatorname{tg} \gamma \right], \end{aligned}$$

откуда

$$M = R_0 (\sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{ctg}^2 \varphi} - \operatorname{tg} \gamma). \quad (235)$$

Зная M , можем определить значение A в уравнении (228)

$$A = R_0 \operatorname{tg} \gamma - R_0 \operatorname{tg} \gamma + R_0 \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{ctg}^2 \varphi}$$

или

$$A = R_0 \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{ctg}^2 \varphi}. \quad (236)$$

Полагая, что по уравнению (236) величина A может быть вычистана, ее в дальнейшем можно считать известной величиной. Принимая во внимание уравнение (235), переписываем уравнение (231)

$$x = A - z \operatorname{tg} \gamma - \operatorname{ctg} \varphi \sqrt{R_0^2 - z^2} \quad (237)$$

и получаем в окончательном виде уравнение режущего лезвия профильного зуба протяжки в координатной системе X, Y, Z .

Для определения площади сечения стружки F целесообразно выразить уравнение режущего лезвия в параметрической форме. Для этого вводим параметр τ , представляющий собой угол поворота радиуса R_0 от плоскости XY . Из фиг. 91 видно, что

$$z = R_0 \sin \tau.$$

Подставляя найденное значение z в уравнение (230) цилиндрической поверхности, получаем

$$y^2 = R_0^2 - z^2 = R_0^2 - R_0^2 \sin^2 \tau = R_0^2 \cos^2 \tau.$$

или

$$Y = R_0 \cos \tau.$$

Исключив из уравнения (229) плоскости передней грани зуба протяжки координату y , получаем

$$x = A - R_0 \operatorname{ctg} \varphi \cos \tau - R_0 \operatorname{tg} \gamma \sin \tau.$$

Система трех уравнений

$$\left. \begin{aligned} x &= A - R_0 (\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau); \\ y &= R_0 \cos \tau; \\ z &= R_0 \sin \tau \end{aligned} \right\} \quad (238)$$

представляет собой в параметрической форме уравнение криволинейного режущего лезвия профильного зуба плоской протяжки для протягивания вогнутой полукруглой формы поверхности тела вращения.

Толщина стружки a мм, срезаемой с протягиваемой поверхности изделия произвольной точкой M режущего лезвия профильного зуба плоской протяжки, определяется по общему уравнению

$$a = \frac{sx}{\sqrt{x^2 + r^2}}. \quad (103)$$

Радиус r обработанной фасонной поверхности полукруглого вогнутого профиля радиуса R_0 является величиной переменной и может быть выражен

$$r = L - z. \quad (239)$$

Подставив в уравнение (103) вместо радиуса изделия r его выражение по уравнению (239), получим

$$a = \frac{sx}{\sqrt{x^2 + (L - z)^2}}. \quad (240)$$

Заменяв координаты x и z параметром τ по уравнению (238), получим уравнение для определения толщины стружки a при протягивании вогнутых полукруглых тел вращения плоскими профильными протяжками

$$a = \frac{s [A - R_0 (\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)]}{V [A - R_0 (\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)]^2 + (L - R_0 \sin \tau)^2}. \quad (241)$$

Для определения площади срезаемого сечения стружки F мм² составляем дифференциальное уравнение. На основании фиг. 91 пишем

$$dF = a \, dl. \quad (242)$$

Дифференциал дуги криволинейного режущего лезвия зуба профильной протяжки

$$dl = V (dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2. \quad (216)$$

Дифференцируя уравнение (238), имеем:

$$\frac{dx}{d\tau} R_0 (\operatorname{ctg} \varphi \sin \tau - \operatorname{tg} \gamma \cos \tau);$$

$$\frac{dy}{d\tau} = -R_0 \sin \tau;$$

$$\frac{dz}{d\tau} = R_0 \cos \tau,$$

откуда следует, что

$$\left. \begin{aligned} dx &= R_0 (\operatorname{ctg} \varphi \sin \tau - \operatorname{tg} \gamma \cos \tau) d\tau; \\ dy &= -R_0 \sin \tau d\tau; \\ dz &= R_0 \cos \tau d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (243)$$

Подставляя в уравнение (216), получим

$$dl = R_0 \sqrt{1 + (\operatorname{tg}^2 \gamma \cos^2 \tau - \operatorname{ctg}^2 \varphi \sin^2 \tau)} d\tau. \quad (244)$$

Подставляя в уравнение (242) значение толщины стружки a по уравнению (241) и значение dl по уравнению (244), имеем

$$dF = \frac{s R_0 [A - R_0 (\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)] V \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \gamma \cos \tau - \operatorname{ctg} \varphi \sin \tau)^2} d\tau}{V [A - R_0 (\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)]^2 + (A + R_0 \sin \tau)^2}. \quad (245)$$

Интегрируя уравнение (245) в пределах от $\tau_{\min}$ до $\tau_{\max}$ выбранного параметра, получим уравнение сечения стружки

$$F = s R_0 \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \frac{[A - R_0 (\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)] V \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \gamma \cos \tau - \operatorname{ctg} \varphi \sin \tau)^2} d\tau}{V [A - R_0 (\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)]^2 + (A - R_0 \sin \tau)^2}. \quad (246)$$

Для определения верхнего предела интегрирования $\tau_{\max}$ необходимо решить совместно уравнение (238) режущего лезвия зуба профильной плоской протяжки и уравнение поверхности вогнутого, полукруглого тела вращения, образованного вращением вокруг оси полуокружности радиуса R_0 . Из фиг. 92 следует, что

$$r^2 = x^2 + (L - z)^2. \quad (247)$$

Но так как

$$L - z = r - t,$$

то

$$r^2 = x^2 + r^2 - 2rt + t^2,$$

откуда

$$2rt = t^2 + x^2;$$

$$r = \frac{t^2 + x^2}{2t};$$

$$r^2 = \frac{t^4 + 2t^2x^2 + x^4}{4t^2}.$$

Исключив из уравнения (247) радиус изделия r , получаем равенство

$$\frac{t^4 + 2t^2x^2 + x^4}{4t^2} = x^2 + (L - z)^2,$$

или

$$t^4 + 2t^2x^2 + x^4 = 4x^2t^2 + 4t^2(L - z)^2;$$

$$t^4 - 2x^2t^2 + x^4 = 4t^2(L - z)^2;$$

$$x^2 - t^2 = 2t(L - z),$$

откуда

$$x = \sqrt{t^2 + 2tL - 2tz}, \quad (248)$$

или

$$x = \sqrt{t^2 + 2tL - 2tR_0 \sin \tau}. \quad (249)$$

Аналитическое определение параметра τ совместным решением уравнений (238) и (249) невозможно, поэтому его находят графически: построением на одном графике кривых по уравнениям (238) и (249) (фиг. 93). Точка пересечения обеих кривых соответствует значению $\tau_{\max}$, равному верхнему пределу интеграла по уравнению (246). Зная пределы интегрирования, можно определить полное сечение срезаемой стружки приближенным решением уравнения (204) с применением формулы Симпсона.

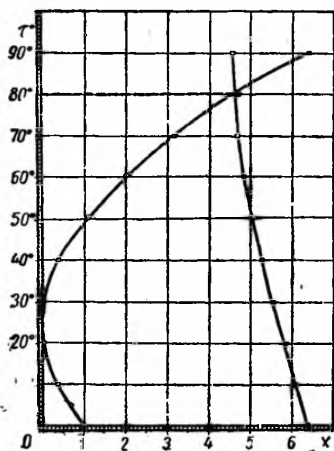
Для этого представляем

$$\xi = \frac{[A - R_0(\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)] \sqrt{1 + (\operatorname{ctg} \varphi \sin \tau - \operatorname{tg} \gamma \cos \tau)^2}}{\sqrt{[A - R_0(\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)]^2 + (L - R_0 \sin \tau)^2}} \quad (250)$$

и пишем формулу Симпсона

$$F = sR_0 \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \frac{[A - R_0(\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)] \sqrt{1 + (\operatorname{ctg} \varphi \sin \tau - \operatorname{tg} \gamma \cos \tau)^2} d\tau}{\sqrt{[A - R_0(\operatorname{ctg} \varphi \cos \tau + \operatorname{tg} \gamma \sin \tau)]^2 + (L - R_0 \sin \tau)^2}} =$$

$$= \frac{sR_0 \tau_{\max}}{6n} [\xi_0 + 4\xi_{1/2} + 2\xi_1 + 4\xi_{1/3} + 2\xi_2 + \dots + 2\xi_{n-1} + 4\xi_{n-1/2} + \xi_n] \text{ мм}^2. \quad (251)$$



Фиг. 93.

Пусть требуется определить толщину и площадь сечения стружки при профильном протягивании полукруглой вогнутой фасонной детали радиуса $R=10$ мм; расстояние $L=20$ мм при подаче протяжки $s=1$ мм/об изделия и заточки режущих зубцов у протяжки под углами

$$\lambda = \varphi = 45^\circ;$$

$$\gamma = 25^\circ.$$

По уравнению (236) определяем размер A :

$$A = R_0 \sqrt{\operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{ctg}^2 \varphi} = 10 \sqrt{0,217 + 1} = 11,05 \text{ мм.}$$

Подставляя частные значения переменных в уравнение (238), получаем

$$x = 11,05 - 10 (\cos \tau + 0,466 \sin \tau).$$

Давая ряд частных значений параметру τ , определяем соответствующие им значения x_1 :

τ°	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
x_1	1,05	0,68	0,39	0,06	0,06	0,39	1,12	2,01	3,45	4,74	6,39

Подставив частные значения переменных в уравнение (249), получим

$$x_2 = \sqrt{41 - 20 \sin \tau}.$$

Давая те же частные значения параметру τ , определяем соответствующие значения x_2 :

τ°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
x_2	6,40	6,10	5,85	5,57	5,3	5,07	4,86	4,70	4,60	4,58

По высчитанным рядам частных значений τ , x_1 , x_2 строим на графике (фиг. 93) две кривые. Значение параметра τ для точек пересечения обеих кривых равно верхнему пределу интеграла по уравнению (251)

$$\tau_{\max} \approx 80^\circ.$$

В формуле Симпсона принимаем $n=2$.

Тогда

n	n_0	$n_{1/2}$	n_1	$n_{1 1/2}$	n_2
τ	0	20	40	60	80
в град.					

Решая для всех значений n и τ уравнение (250)

$$\xi = \frac{[11,05 - 10 (\cos \tau + 0,466 \sin \tau)] \sqrt{1 + (\sin \tau + 0,466 \cos \tau)^2}}{\sqrt{11,05 - 10 (\cos \tau + 0,466 \sin \tau)^2 + (20,00 - 10 \sin \tau)^2}},$$

получаем ряд численных значений

ξ_0	$\xi_{1/2}$	ξ_1	$\xi_{1 1/2}$	ξ_2
0,0040	0,0083	0,0845	0,6450	0,9650

Подставляя высчитанные значения ξ в уравнение (251), имеем сечение стружки

$$F = \frac{1 \cdot 10 \cdot 80 \cdot 6,28}{6 \cdot 2,360} [0,0040 + 0,332 + 0,1690 + 0,2580 + 0,9650] = 1,78 \text{ мм}^2.$$

Толщина стружки, срезаемой в момент максимального сечения стружки F , определяется по уравнению (241):
при $\tau = 0^\circ$

$$a = \frac{1(11,05 - 10,1)}{\sqrt{1,1 + (20,00)^2}} = 0,048 \text{ мм},$$

при $\tau_{\max} = 80^\circ$

$$a = \frac{1[11,05 - 10(0,174 + 0,46)]}{\sqrt{[11,05 - 10(0,174 + 0,46)]^2 + (20,00 - 9,848)^2}} = 0,154 \text{ мм}.$$

§ 14. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАБОТКИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ МЕТОДОМ ПРОТЯГИВАНИЯ

С целью проверки правильности выводов теоретического исследования, изложенного в предшествующих параграфах, в Лаборатории резания металлов МВТУ им. Н. Э. Баумана были проведены экспериментальные испытания обработки цилиндрических поверхностей методом протягивания.

При постоянной разности высот соседних зубьев все рабочие зубья протяжки срезают слой одинаковой толщины, работают в практически равных режимных условиях и обладают равной стойкостью. Для экономии материала, средств и времени были проведены стойкостные испытания однозубой протяжкой, моделирующей конструкцию плоской протяжки.

Режущий зуб протяжки был изготовлен из быстрорежущей стали марки РФ1. После закалки и двойного отпуска твердость его по Роквеллу была $R_C = 64$. Заточенный, обработанный оселком и подготовленный к испытанию зуб закрепляется в клиновом пазе корпуса.

Испытания проводились на токарно-револьверном станке.

Обрабатываемая болванка диаметром 220 мм и длиной 800 мм закреплялась на станке обычным способом.

Экспериментальная протяжка монтировалась на каретке станка посредством специальной плиты, позволяющей осуществить быструю и точную установку режущего лезвия в требуемом положении.

За один проход протягивали поясok шириной 60 мм. Это позволило иметь от 10 до 12 повторных проходов по длине болванки. Затем осуществляли подъем всего корпуса протяжки на величину $t = 1$ мм за счет подкладок этой толщины.

Протяжке сообщали прямолинейное рабочее движение включением механизма поперечной подачи $s = 0,34$ мм/об.

Экспериментальная проверка проводилась при разных углах λ в пределах от 15° до 75° . Эта проверка показала, что наиболее спокойно процесс резания протекал при $\lambda = 45^\circ$. Поэтому стойкостные испытания были проведены при установке режущего лезвия зуба под этим углом. Осевая подача

$$s_0 = \operatorname{tg} \lambda = 0,34 \text{ мм/об},$$

а сечение срезаемой стружки

$$F = \frac{s_0 t}{\cos \lambda} = \frac{0,34 \cdot 1}{\cos 45^\circ} = 0,48 \text{ мм}^2.$$

Зуб протяжки имел следующие углы, измеряемые в нормальной плоскости:

задний угол $\alpha = 20^\circ$
 передний угол $\gamma = 10^\circ$
 угол в плане $\varphi = 0^\circ$
 угол возвышения $\lambda = 0^\circ$

Во время рабочего хода протяжки из-за наклонной установки режущего лезвия под углом $\lambda = 45^\circ$ относительно оси вращения протягиваемой болванки и изменений углов, связанных с относительным перемещением инструмента с одной и изделия и стружки с другой стороны, углы в движении, вычисленные по формулам, имели следующие величины:

Угол заднего зазора	$\alpha_{\text{зад}}$	В точке <i>H</i>	В точке <i>K</i>
		28°26'	27°32'
Передний угол в направлении сбеге стружки	γ_∂	35°29'	44°08'
Угол наклона режущего лезвия	φ_∂	44°26'	45°00'
Угол сбеге стружки	λ_∂	44°26'	45°00'

Следует отметить, что измерения универсальным инструментальным микроскопом направления износа подтвердили правильность расчетных формул, вывод которых дан в I части.

Сопоставление величин исходных углов и углов в движении позволяет на примере протягивания цилиндров плоскими протяжками наглядно убедиться, насколько велика может быть разница между углами в статическом состоянии и в процессе работы.

Изменения в углах, связанные с положением точки *H* начала резания ниже центра $O_{\text{ц}}$ вращения изделия и с положением точки *K* конца резания по центру $O_{\text{ц}}$, остаются в пределах, выгодных для процесса резания.

В данном примере при заточке относительно небольшого по величине переднего угла и сохранении достаточно массивного и прочного тела у зуба протяжки только за счет его наклонной установки и влияния посредством этого на направление относительного перемещения стружки по передней поверхности представилось возможным увеличить эффективную величину этого угла до 45° . Это дало возможность изменить в благоприятную сторону весь ход процесса образования стружки и, как показали стойкостные испытания, увеличить стойкость и улучшить качество обработанной поверхности.

Продолжительность непосредственного контакта каждой в отдельности рассматриваемой точки режущего лезвия зуба про-

тяжки с изделием, т. е. продолжительность ее рабочего цикла равна

$$T_m = \frac{\sqrt{2a_z R_z - a_z^2}}{sn} \text{ мин.}, \quad (252)$$

а продолжительность работы всего наклонно расположенного зуба

$$T_z = \frac{l \sin \lambda + \sqrt{2a_z R_z - a_z^2}}{sn} \text{ мин.} \quad (253)$$

Машинное время работы всей протяжки, имеющей Z зубьев, равно

$$T_m = \frac{L + \sqrt{2a_z R_z - a_z^2}}{sn} \text{ мин.} \quad (254)$$

В уравнениях (252), (253) и (254):

a_z — толщина слоя, срезаемого одним зубом протяжки в мм;

R_z — радиус обрабатываемой поверхности рассматриваемым зубом протяжки в мм;

s — поперечная подача протяжки в мм/об изделия;

n — число оборотов изделия в минуту;

l — длина режущего лезвия одного зуба в мм;

L — длина протяжки в мм, занимаемая всеми ее режущими зубьями.

Отношение

$$\eta = \frac{T_m}{T_m}$$

колеблется в пределах от 0,02 до 0,04. Продолжительность непосредственной работы каждой в отдельности рассматриваемой точки режущего лезвия зуба протяжки составляет всего лишь примерно 2—4% от продолжительности работы всей протяжки.

В этом заключается основная причина большой стойкости и производительности протяжек.

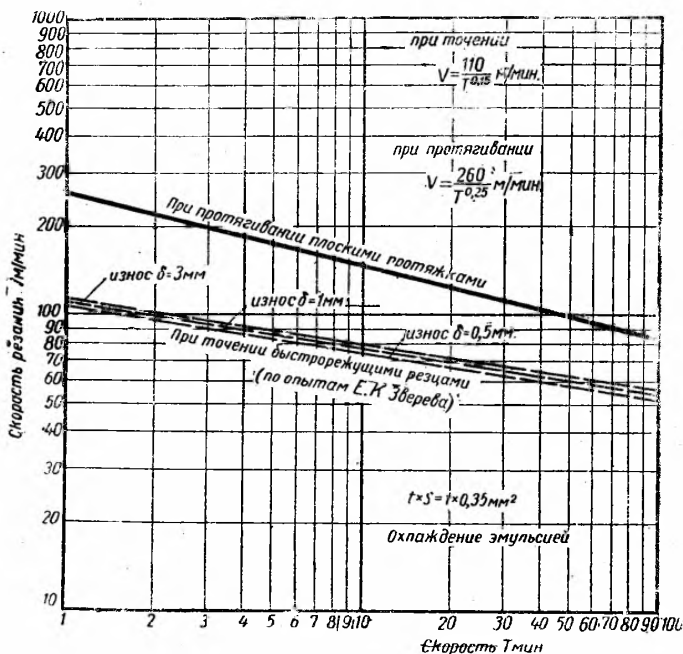
Если при протягивании тел вращения установить режимы резания, обеспечивающие 60-минутную стойкость каждой в отдельности рассматриваемой точки режущего периметра, то стойкость всей протяжки будет порядка 25—50 часов непрерывной работы, а производительность за этот период порядка 1500—3000 деталей.

Отмеченные выше положительные качества метода протягивания тел вращения были полностью подтверждены проведенными экспериментальными испытаниями.

Результаты стойкостных испытаний приведены на графике (фиг. 94). Сопоставляя линию зависимости $v = -\frac{C_1}{T_m}$ для экспериментальной протяжки с линией аналогичной зависимости для быстрорежущего токарного реза, полученной при обработке той же стали доц. канд. техн. наук Зверевым, обнаруживаем, что в одинаковых режимных условиях метод протягивания позволяет работать со скоростью резания, превышающей скорость резания при точении в 1,6 раз, или при одинаковой скорости резания обладает стойкостью, превосходящей стойкость токарного реза в 20—25 раз. Если учесть, что линия зависимости

$v = f(T)$ для протяжек выражает стойкость каждой в отдельности рассматриваемой точки ее режущего лезвия, то стойкость всей протяжки будет в 25÷50 раз больше. Однако следует отметить, что сопоставление реза и протяжки по ее интегральной стойкости непоказательно, ибо оно содержит несравнимые между собой величины.

Из результатов экспериментальных опытов видно, что токарные резцы совершенно неспособны резать при скорости резания



Фиг. 94.

$v \approx 200$ м/мин, тогда как при этой же скорости быстрорежущий зуб экспериментальной протяжки показал интегральную стойкость для каждой в отдельности рассматриваемой точки около 2 мин., т. е. интегральную стойкость всей протяжки порядка 50÷100 мин.

Экономическая стойкость каждой точки зуба протяжки, так же как у токарного резца, примерно равна 60 мин. Для условий, соответствующих условиям проведенного экспериментального испытания, экономическая скорость резания может быть равна $v \approx 100$ м/мин. Это в среднем превышает экономическую скорость резания резцами в 1,6 раза.

Наблюдения за износом режущих элементов на зубе экспериментальной протяжки показали, что при указанных режимах

резания на передней поверхности вдоль всего режущего лезвия возникает ямка со следами износа, образующими с нормалью к режущему лезвию угол отклонения стружки $\lambda_0 = 45^\circ$. На задней поверхности появляется фаска износа со следами, лежащими в плоскости вращения изделия, т. е. образующими с режущим лезвием угол $45^\circ = 90^\circ - \lambda$.

Характерные признаки окончательного износа зуба протяжки были сходны с таковыми для цилиндрических фрез и выражались в появлении местных разрушений режущего лезвия. Вследствие этого на обработанной поверхности оставались круговые гребешки, отчего качество обработанной поверхности ухудшалось и дальнейшее продолжение работы протяжки становилось нецелесообразным. Этот признак был принят за критерий износа во время стойкостных испытаний.

По техническим условиям не представлялось возможным провести экспериментальные испытания спиральных протяжек. Однако есть основания считать, что так как условия резания спиральными и плоскими протяжками весьма сходны между собой, то и результаты их износа и стойкости также должны быть сходны между собой. Поэтому достаточно правильное суждение о режимных возможностях спиральных протяжек может быть вынесено на основании результатов испытания плоских протяжек.

§ 15. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПИРАЛЬНЫХ ПРОТЯЖЕК ДЛЯ ПРОТЯГИВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И КОНИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ

Исследование принципиальных кинематических схем резания приводит в результате последовательного перехода (фиг. 49) от одной схемы к другой к методу протягивания тел вращения спиральными протяжками, выраженному схемой 501. По этой схеме, выражающей сочетание двух вращательных движений *A* и *B*, представляется возможным обработать методом протягивания изделия длиной, равной длине самой спиральной протяжки. Это обстоятельство ограничивает возможности применения метода протягивания по схеме 501, ибо в технологии изготовления и эксплуатации спиральных протяжек большой длины может встретиться ряд трудно преодолимых препятствий. По этим причинам основанный на этой схеме метод протягивания может найти практическое применение лишь в пределах ограниченной длины обрабатываемых изделий.

Для расширения возможности применения метода протягивания тел вращения спиральными протяжками и распространения присущих ему положительных качеств также и на область обработки цилиндрических и конических поверхностей большой длины необходимо дополнить выраженные схемой 501 два главных движения третьим движением, направленным либо вдоль образующей цилиндра, либо вдоль образующей конуса. Такому

требованию удовлетворяют принципиальные кинематические схемы резания 701 и 711 (фиг. 49).

В обоих случаях два первых главных движения A и B сохраняют свой прежний смысл, а именно:

движение A , сообщаемое инструменту, является окружной подачей s мм/об изделия;

движение B , сообщаемое изделию, является окружной скоростью вращения последнего и тождественно со скоростью резания v м/мин.

Поскольку от увеличения числа главных движений конструкция спиральных протяжек не меняется, связанные с нею два вспомогательных движения сохраняют свой смысл, а именно:

а) вспомогательное движение B тождественно поперечной подаче (в рассматриваемом случае глубина резания t мм за проход одного зуба) и достигается заточкой с превышением каждого последующего зуба протяжки над соседним предшествующим;

б) вспомогательное движение Γ тождественно продольной подаче s_0 и достигается выполнением на протяжке наклонно расположенного зуба под углом λ к оси протяжки.

Добавляемое третье главное движение D , как направленное вдоль образующей цилиндра или конуса, также тождественно продольной подаче, как и вспомогательное движение Γ и, суммируясь с последним, дает суммарную осевую подачу s'_0 .

В результате сочетания всех пяти одновременно действующих главных и вспомогательных движений возможен процесс протягивания цилиндрических и конических поверхностей большой длины.

За каждый полный оборот спиральной протяжки она обрабатывает на поверхности изделия винтообразно расположенную полосу шириной, равной длине протяжки l_0 . Для протягивания цилиндра или конуса длиной L мм потребуется $\frac{L}{l_0}$ оборотов спиральной протяжки. Тогда обработанная методом протягивания цилиндрическая или коническая поверхность будет образована сопряжением в одну общую поверхность всех $\frac{L}{l_0}$ витков винтовой полосы шириной l_0 мм.

Допустимая осевая подача, сообщаемая протяжке в качестве третьего главного движения D , так же как и при наружном круглом шлифовании, не должна превосходить ширину l_0 протягиваемой полосы за каждый оборот спиральной протяжки.

С теоретической точки зрения условия протягивания по схемам 701 и 711 отличны от условий протягивания по схеме 501. Это отличие выражается в переходе от плоскостных к пространственным траекториям относительного рабочего движения, а следовательно, и в изменении величины всех углов в движении и вытекающих отсюда последствий.

Равным образом изменяются также: а) толщина стружки a , срезаемой каждой в отдельности рассматриваемой точкой режу-

шего лезвия на пути ее движения от начальной точки H до конечной точки K контакта с изделием, и б) величина сечения стружки F .

Все эти изменения требуют по существу повторения для схем 701 и 711 исследований, проведенных для схемы 501.

Мы считаем возможным в рамках настоящей работы не повторять изложения этих подробных исследований и ограничиться лишь приведенными выше указаниями о возможности применения на основе принципиальных кинематических схем резания 701 и 711 метода протягивания спиральными протяжками цилиндрических и конусных поверхностей большой длины.

§ 16. ОБРАБОТКА ТЕЛ ГРАНЕНОГО СЕЧЕНИЯ

В § 2 при исследовании изменения характера траекторий относительного рабочего движения, совершаемого точками режущих лезвий спиральной протяжки при разных отношениях

$\varepsilon = \frac{v_{изд}}{v_{пр}}$ скоростей вращательных движений A и B , сообщаемых изделию и инструменту согласно принципиальной кинематической схеме 501, было установлено, что в зоне, когда отношение $2 < \varepsilon < 3$ и рассматриваемая точка M режущего лезвия занимает вполне определенное положение внутри отнесенной к инструменту подвижной полойной окружности радиуса a , траекторией относительного рабочего движения является выпрямленная укороченная гипоциклоида (фиг. 62). Это свойство прямолинейности гипоциклической траектории может быть использовано для обработки резцами токарного типа тел многогранного профиля с технически прямолинейными контурными участками и с правильными угловыми переходами от одной к другой грани.

Однако, несмотря на то, что при указанных отношениях ε скоростей двух главных движений A и B , выраженных схемой 501, вполне осуществимо относительное рабочее движение точки M режущего лезвия инструмента по выпрямленной укороченной гипоциклоиде, наличие только двух главных движений недостаточно для эффективной практической реализации этих возможностей.

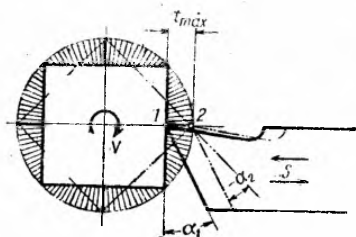
Нормальные эксплуатационные условия металлорежущих инструментов основаны на постепенном срезании тонкими слоями всего объема металла, подлежащего снятию с поверхности заготовок.

Эти условия могут быть обеспечены, если к двум главным движениям A и B , выражаемым принципиальной кинематической схемой 501, добавить третье главное движение G , тождественное продольной подаче s_0 , и этим самым перейти к схемам 701 и 711.

Третье главное движение G может быть направлено либо вдоль оси обрабатываемой детали, когда она имеет форму многогранной призмы, или же может быть направлено под углом α

относительно этой оси, когда деталь имеет форму многогранной пирамиды. Возможность использования принципиальной кинематической схемы резания 701 для обработки многогранных призм нашла свое отражение на фиг. 49.

Так, применение для этой цели простейших кулачковых механизмов приводит к принципиальной кинематической схеме 615. На протяжении нескольких десятилетий разными авторами и фирмами были предложены и частично реализованы конструкции приспособлений и специальных станков, основанные на сообщении инструменту и изделию главных движений, согласно схеме 615. Существен-



Фиг. 95.

ным недостатком всех этих конструкций является изменение на части режущего периметра заднего угла в движении α_d в пределах от 0° до 45° (фиг. 95). В отдельных случаях (при малом числе и криволинейной форме граней обрабатываемых деталей) это может служить причиной невозможности осуществления режущим инструментом процесса резания из-за уменьшения заднего угла зазора $\alpha_{зад}$ до величин, близких к нулю или даже отрицательных.

сохраняет силу и для этих усложненных механизмов специальных станков. Учитывать влияние вспомогательного движения B и положения, занимаемого резцом в каждое мгновение его работы, приходится лишь при определении величины углов в движениях $\alpha_{\text{аз}}$, λ_{θ} и γ_{θ} .

На самых разнообразных сочетаниях и соотношениях скоростей главных движений A и B , выражаемых принципиальной кинематической схемой резания 701, основаны ряд конструкций приспособлений и станков для обработки граненых тел.

Некоторые авторы (Витте в 1889 г., Мостков, Эйг), используя два равномерных вращательных движения A и B , достигают за счет эксцентриситета осей вращения изделия и инструмента

при определенном отношении $\varepsilon = \frac{v_{\text{изд}}}{v_{\text{инстр}}}$ возможности обработки граненых тел в результате очерчивания их контура режущими лезвиями резцов, имеющими траекториями своего относительного рабочего движения гипоциклоидальные кривые.

В отличие от перечисленных авторов (Свенсон 1890 г., Швеция), также используя два главных вращательных движения A и B , достигает возможности обработки граненых тел резцами при параллельном наружном расположении осей вращения O_A и O_B и переменном отношении угловых скоростей пропорционально половине общего количества сторон обрабатываемой граненой детали. Это последнее обстоятельство заранее исключает возможность обработать механизм Свенсона граненые тела с нечетным числом граней. Вследствие того, что у Свенсона диагональные размеры обрабатываемых граненых деталей равны диаметральному размеру пары резцов, точка M режущего лезвия внутри подвижной подоидной окружности располагается так, что на обрабатываемой детали получить прямолинейные грани не представляется возможным и они по причинам, изложенным в § 2, II части, при рассмотрении схем, показанных на фиг. 61 и 63, получаются в одних случаях вогнутыми, в других — выпуклыми.

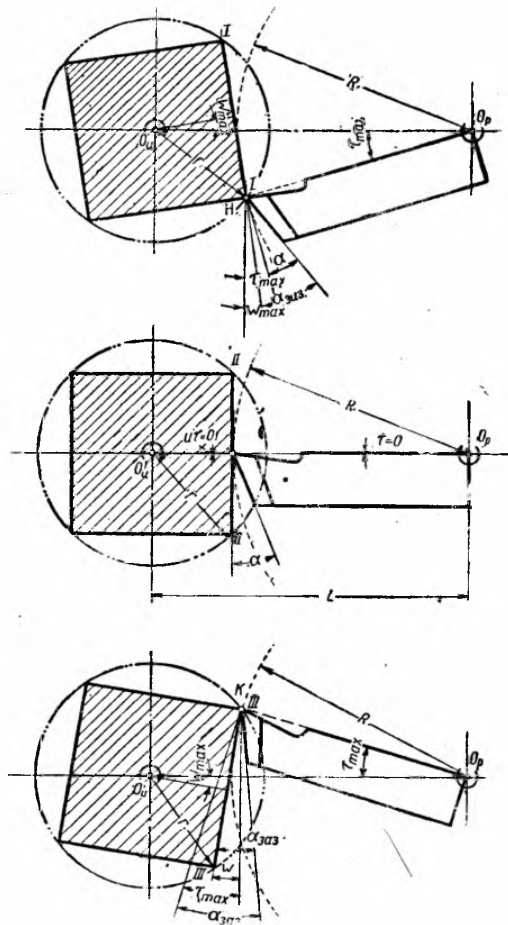
Несмотря на эти недостатки, нам кажется, что из всех вышеперечисленных механизмов механизм Свенсона ближе всего к технически правильному разрешению проблемы обработки граненых призматических и пирамидальных тел с произвольным числом граней, очерченных прямолинейными контурными линиями с правильными угловыми переходами между ними. Увлечение некоторых из авторов возможностью обработать по схемам 615, 701 и 711 изделия самого произвольного фасонного сечения с сильно вогнутыми или выпуклыми контурными очертаниями и закругленными угловыми переходами представляет, пожалуй, только теоретический интерес. Практика современного машиностроения базируется на сопряжении деталей, имеющих простейший, обычно прямолинейный контур очертания поперечного сечения, если не считать зубчатых колес и валиков специального назначения, обрабатываемых методом обкатки на зубодолбежных или же зубофрезерных станках. Это замеча-

ние сохраняет силу также и в отношении обработки слитков, обрабатываемых на металлургических заводах перед прокаткой. В этом случае важно иметь не закругленные по радиусу углы перехода от одной к другой грани, а важно полностью обра-

ботать всю поверхность слитка и удалить загрязненный шлаком поверхностный слой. Это легко может быть достигнуто, если вести обработку, например, четырехгранной пирамиды как восьмигранной, рассматривая углы слитка как очерченные прямолинейными профильными линиями, но малой линейной длины (достаточной для обработки каждой поверхности слитка).

На принципиальных кинематических схемах резания 701 и 711, сохраняя внешнее сходство, можно обосновать новый метод обработки призматических и пирамидальных тел произвольной длины, более совершенный, чем осуществляемый при помощи механизма Свенсона.

Из фиг. 95 видно, что обработке граненых тел по схеме 501 соответствует на каждой грани изменение глубины ре-



Фиг. 97.

зания t от нуля до максимума и снова до нуля. Максимальная глубина резания

$$t_{\max} = \frac{D}{2} \left(1 - \cos \frac{180}{m} \right), \quad (255)$$

где m — число граней обрабатываемого многогранника,

D — диаметр заготовки в мм.

Срезание с поверхности заготовки слоя металла переменной толщины возможно при наличии периодически повторяющегося сближения вершины резца и оси заготовки. Это сближение по схеме 501 может быть достигнуто сообщением резцу вращательного движения вокруг оси O_p , параллельной оси O_d , изделия. При вращении заготовки по часовой стрелке резцы, обрабатывающие граненую поверхность, также должны вращаться по часовой стрелке. Это приводит к тому, что обработка каждой текущей грани (фиг. 97) начинается в начальной точке резания H , когда обрабатываемая прямолинейная контурная линия этой грани $I—I$ занимает наклонное положение. Такому положению соответствует угловой поворот заготовки $\omega_{\max}$ и угловой поворот резца $\tau_{\max}$.

В процессе непосредственного резания резец, также вращаясь вокруг оси O_p , должен своей вершиной скользить по обрабатываемому прямолинейному контуру текущей грани и срезать слой металла переменной глубины t в пределах от 0 до $t_{\max}$ и снова до 0.

Максимальная глубина резания $t_{\max}$ будет срезаться в момент, когда обрабатываемая контурная линия занимает положение $II—II$. Этому положению соответствуют угловой поворот заготовки $\omega = 0$ и угловой поворот резца $\tau = 0$. Конечному моменту обработки текущей грани соответствует ее положение $III—III$, угловой поворот заготовки на $\omega_{\max}$ и положение вершины резца в конечной точке резания K , определяемое угловым поворотом резца на $\tau_{\max}$.

Следовательно, полная обработка одной грани соответствует угловому повороту заготовки на $2\omega_{\max}$ и угловому повороту резца на $2\tau_{\max}$.

Так как угол $2\omega_{\max}$ во много раз меньше центрального угла $\frac{360^\circ}{m}$, на который опирается обрабатываемая граненая сторона детали, то углу $\frac{360}{m} - 2\omega_{\max}$ поворота заготовки будет соответствовать холостой цикл, промежуточный между двумя рабочими циклами обработки сопряженных граней обрабатываемой детали.

Равным образом и резец после поворота на $2\tau_{\max}$ вокруг своей оси O_p , соответствующего рабочему циклу обработки одной грани, имеет промежуточный холостой цикл, сменяемый очередным рабочим циклом обработки другой грани той же детали.

Из схемы (фиг. 98) видно, что

$$\tau > \omega.$$

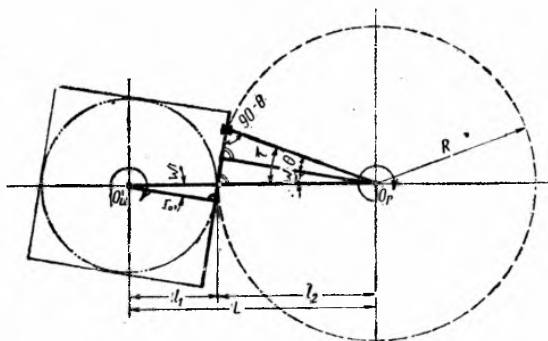
Отношение

$$\frac{\tau}{\omega} = i$$

выражает передаточное число кинематической цепи механизма, связывающего вращение изделия и резца.

Из схемы 501 ясно, что как заготовке, так и резцу сообщаются равномерные угловые скорости ω и τ . Передаточное число i остается постоянным числом на протяжении всего рабочего цикла и при осуществлении механизма, передающего вращение заготовке и резцу, особых затруднений не встречается. Остается выяснить, обладает ли при $i = \text{const}$ выпрямленная укороченная гипоциклоида (фиг. 62) математической прямолинейностью или же мы имеем основание говорить лишь о технической прямолинейности этой кривой.

Для этого рассмотрим фиг. 98.



Фиг. 98.

Заготовка радиусом наружной окружности r подвергается обработке на многогранник с m сторонами. Тогда радиус r_0 окружности, вписанной в обрабатываемый многогранник,

$$r_0 = r \cos \left(\frac{180}{m} \right). \quad (256)$$

Радиус r_0 перпендикулярен к любой стороне многогранника. Пусть обрабатываемая сторона многогранника занимает положение, определяемое угловым поворотом ω относительно горизонтальной оси. На некотором расстоянии L от оси O_u заготовки расположена ось вращения O_p . Режущее лезвие скользит своей вершиной по равномерно вращающейся вокруг оси O_p стороне многогранника. В рассматриваемом положении вершина резца может занять одно положение, определяемое точкой пересечения обрабатываемой стороны окружностью радиуса R .

Положение этой точки определяет величину углового поворота резца τ .

Опустим из центра O_p перпендикуляр на обрабатываемую сторону. Этот перпендикуляр с центральной линией, соединяющей

центры O_u и O_p , образует угол ω . Таким образом, угловой поворот резца τ может быть рассматриваем как

$$\tau = \omega + \theta.$$

Из фиг. 98 следует, что

$$r_0 + R = l_1 + l_2 = \frac{r_0}{\cos \omega} + \frac{R \cos \theta}{\cos \omega}. \quad (257)$$

Решая уравнение (257) относительно θ , получаем

$$\cos \theta = \cos \omega \left(1 + \frac{r_0}{R} \right) - \frac{r_0}{R}. \quad (258)$$

Из уравнения (258) следует, что для обработки математически прямолинейной стороны граненой детали необходимо, чтобы на протяжении рабочего цикла была обеспечена выраженная этим уравнением пропорциональность между $\cos \theta$ и $\cos \omega$. Но так как в правой части эта пропорциональность содержит два постоянных числа, то изменение угла θ не может быть строго пропорциональным изменению угла ω . Следовательно, передаточное число

$$i = \frac{\tau}{\omega} = 1 + \frac{\theta}{\omega}$$

также не может быть строго постоянным числом на протяжении рабочего цикла. Сохраняя передаточное число i постоянным, мы нарушаем математическую прямолинейность и можем поэтому говорить лишь о технической прямолинейности обрабатываемых сторон.

Подставляя в уравнение (258) значение r_0 по уравнению (256), получаем

$$\theta = \arccos \left[\cos \omega - \frac{r}{R} \left(\cos \frac{180^\circ}{m} \right) (1 - \cos \omega) \right]. \quad (259)$$

Тогда угловая скорость τ вращения резца

$$\tau^\circ = \omega^\circ + \arccos \left[\cos \omega - \frac{r}{R} \left(\cos \frac{180^\circ}{m} \right) (1 - \cos \omega) \right]. \quad (260)$$

Для определения продолжительности рабочего цикла обработки одной стороны многогранника определяем наибольшую величину углового поворота заготовки по расчетной схеме (фиг. 99)

$$\omega_{\max} = \frac{180^\circ}{m} - \arccos \left[\frac{L^2 + r^2 - R^2}{2rR} \right].$$

Но так как

$$L = R + r \cos \frac{180^\circ}{m},$$

то при

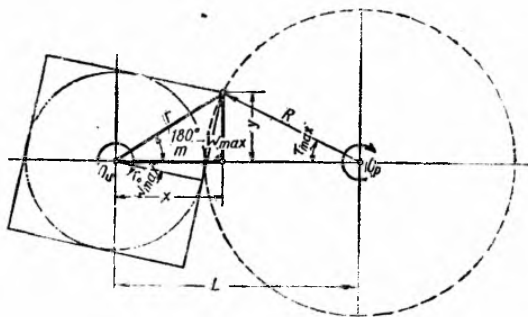
$$\tau_1 = \frac{r}{R}$$

получаем

$$\omega_{\max} = \frac{180^\circ}{m} - \arccos \cos \left[\frac{\cos \frac{180^\circ}{m} + 0,5 \eta (1 + \cos^2 \frac{180^\circ}{m})}{1 + \eta \cos \frac{180^\circ}{m}} \right]. \quad (261)$$

Для случая четырехгранного сечения $m=4$ и уравнение (261) принимает вид

$$\omega_{\max} = 45^\circ - \arccos \left[\frac{1,5 \eta + \sqrt{2}}{2 + \eta \sqrt{2}} \right], \quad (262)$$



Фиг. 99.

а для случая шестигранного сечения $m=6$ уравнение (261) принимает вид

$$\omega_{\max} = 30^\circ - \arccos \left[\frac{1,75\eta + 1,732}{2 + 1,732\eta} \right]. \quad (263)$$

Вычисленные по уравнениям (262) и (263) цифровые величины $\omega_{\max}$ приведены в табл. 12.

Таблица 12

Численные значения углового поворота $\omega_{\max}$

		η	2	1	$1/2$	$1/3$	$1/4$	$1/5$	$1/10$
$\omega_{\max}$ при	$m=4$		20°47'	13°30'	8°08'	5°21'	4°12'	3°25'	1°43'
	$m=6$		13°13'	9°14'	5°39'	4°02'	3°23'	3°20'	1°39'

Из этой таблицы видно, что продолжительность рабочего цикла уменьшается с уменьшением

$$\eta = \frac{r}{R}.$$

Наиболее вероятное отношение η с точки зрения удобства конструктивного осуществления механизма приспособления

к станку или специального станка для обработки граненых деталей будет

$$\eta \approx \frac{1}{3}$$

Этому отношению соответствуют углы поворота рабочих циклов

$$\begin{array}{ll} 2\omega_{\max} = 10^{\circ}42' & \text{для } m=4 \\ 2\omega_{\max} = 8^{\circ}04' & \text{для } m=6, \end{array}$$

и углы поворота холостых циклов заготовки на

$$\begin{array}{ll} 79^{\circ}08' & \text{для } m=4; \\ 51^{\circ}56' & \text{для } m=6. \end{array}$$

Если в уравнение (260) подставить приведенные в табл. 12 цифровые величины $\omega_{\max}$, то получим соответствующие рабочим циклам максимальные угловые повороты резца $\tau_{\max}$, приведенные в табл. 13.

Таблица 13

Численные значения углового поворота $\tau_{\max}$

η		2	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{10}$
$\tau_{\max}$ при	$m=4$	53°20'	31°10'	17°36'	11°18'	8°46'	7°04'	3°29'
	$m=6$	36°10'	21°51'	12°25'	8°37'	7°07'	6°56'	3°23'

Сопоставляя вычисленные величины $\omega_{\max}$ и $\tau_{\max}$, замечаем, что угловой поворот резца за один рабочий цикл примерно в 2 раза больше соответствующего углового поворота изделия.

Таблица 14

Численные значения передаточного числа i

η		2	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{10}$
i при	$m=4$	2,56	2,31	2,16	2,10	2,08	2,06	2,03
	$m=6$	2,67	2,37	2,20	2,13	2,10	2,07	2,05

Численные величины передаточного числа

$$i = \frac{\tau_{\max}}{\omega_{\max}}$$

приведены в табл. 14, из которой видно, что величина i меняется в зависимости от m и η и асимптотически приближается к 2 по мере уменьшения η .

Если бы представилась возможность подобрать такое отношение η , которому соответствовало бы передаточное число $i=2$, то угловой поворот резца был бы всегда ровно в 2 раза больше углового поворота заготовки.

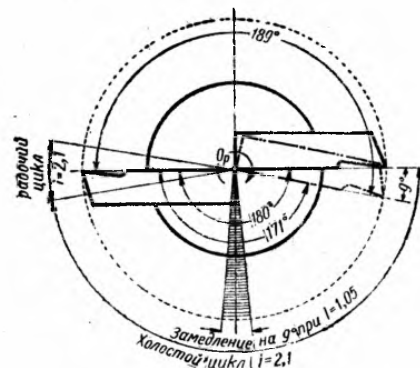
Тогда при $m=4$ за время обработки одной грани и поворота заготовки на 90° резец повернулся бы на 180° и занял бы положение, диаметрально противоположное тому, которое требуется для обработки другой соседней грани четырехгранника. В этом случае выход из положения был бы найден применением на одной вращающейся резцовой головке двух диаметрально противоположно расположенных резцов. В результате каждый из них обрабатывал бы только две противоположно расположенные стороны четырехгранника.

То же получилось бы при обработке шестигранника, но с той лишь разницей, что на резцовой головке пришлось бы установить не два, а три резца, смещенных один относительно другого на 120° .

Но в действительности, как это видно из табл. 14, потребные передаточные числа i всегда больше 2 и представляют собой дробные числа.

Если взять отношение $\eta = 1/4$, то $i = 2,1$ и при $m=4$ за время поворота заготовки на 90° резец повернется на угол 189° , а при $m=6$ за время поворота заготовки на 60° резец повернется на 126° .

Таким образом, резцы приходится располагать в резцовой головке относительно



Фиг. 100.

другого не на 180 или 120° , а соответственно на 189° и 126° , как это показано на схеме (фиг. 100) для случая обработки квадрата.

Но подобное расположение резцов нарушает необходимую периодичность повторения рабочих циклов и, очевидно, выход из положения может быть один — расположить резцы один относительно другого на расстояниях, кратных углам поворота заготовки $\frac{180^\circ}{m}$, т. е. при $m=4$ со смещением на 180° , а при $m=6$ со смещением на 120° .

Возникающую при этом разницу (в первом случае на 9° , а во втором на 6°) необходимо компенсировать за счет периодически повторяющегося изменения угловой скорости τ вращения резцовой головки так, чтобы за время рабочего цикла передаточное число выдерживалось бы точно $i=2,1$, а за время холостого цикла угловая скорость замедлялась бы на время, достаточное для того, чтобы общий угловой поворот резцовой головки уменьшался на 9° при $m=4$ и на 6° при $m=6$.

В случае обработки пятигранника ($m=5$) максимальная величина угла поворота заготовки за рабочий цикл $2 \omega_{\max} = 9^\circ 22'$,

а максимальная величина угла поворота резцовой головки за это же время $2\tau_{\max} = 20^\circ 02'$. Нужно передаточное число $i = 2,135$.

Угловой поворот заготовки за время обработки одной грани пятигранника равен 72° . Тогда при $i = 2,135$ соответствующий угол поворота резцовой головки равен $153^\circ 43'$. Ближайший угол, кратный 360° , равен 120° . Разница в $33^\circ 43'$ должна быть компенсирована замедлением вращения резцовой головки за время холостого цикла, соответствующего углу поворота резцовой головки на $51^\circ 58'$.

Важным моментом, предопределяющим возможность эффективного процесса резания, является закономерность изменения углов в движении α_d , λ_d и γ_d .

Если в основу метода обработки граненых деталей положить принципиальную кинематическую схему резания 701, то величина заднего угла движения α_d на главном режущем лезвии, расположенном относительно обрабатываемой детали так, как это показано на фиг. 104, мало отличается от α_d для токарного резца подрезного типа в силу наличия в процессе резания обоих составляемых резцов равномерного движения осевой подачи S_0 , выраженной в схеме 701 как движение Γ .

На вершине резца изменение заднего угла движения α_d подчиняется несколько иной закономерности.

В начальный момент резания (фиг. 97) задний угол движения α_d на вершине резца образован с одной стороны наклонно расположенной и вращающейся обрабатываемой контурной линией $1-1$ многогранника, а с другой стороны задней гранью самого резца, тоже вращающейся в процессе резания.

В начальный момент резания в точке H задний угол зазора

$$\alpha_{\text{заз}}^\circ = \alpha^\circ + \tau_{\max}^\circ - \omega_{\max}^\circ.$$

В среднем положении, когда срезается наибольшая глубина стружки $t_{\max}$,

$$\alpha_{\text{заз}} = \alpha.$$

В конечный момент резания в точке K задний угол зазора

$$\alpha_{\text{заз}} = \alpha - \tau_{\max} + \omega_{\max}.$$

Но так как угол поворота резцовой головки

$$\tau = \omega + \theta,$$

то, заменив τ его значением, получаем уравнение колебания задних углов зазора

$$\alpha_{\text{заз}} = \alpha \pm \theta,$$

или, принимая во внимание уравнение (260),

$$\alpha_{\text{заз}} = \alpha \pm \arccos \left[\cos \omega_{\max} - \frac{r}{R} \left(\cos \frac{180^\circ}{m} \right) (1 - \cos \omega_{\max}) \right]. \quad (264)$$

Положительный знак в уравнении (264) соответствует начальному моменту резания в точке H , а отрицательный знак — конечному моменту резания в точке K .

Из уравнения (264) следует, что конструктивный задний угол α на вершине резца должен быть больше или в крайнем случае равен углу θ . Но так как из табл. 12 и 13 видно, что угол θ лишь незначительно превышает $\omega_{\max}$, то приближенно угол заточки α на вершине резца должен быть

$$\alpha > \omega_{\max}.$$

Для наиболее вероятных соотношений, начиная от $\eta = 1/3$ и меньше, необходимый задний угол заточки вершины резца должен быть

$$\text{при } m = 4 \quad \alpha > 5^\circ 57';$$

$$\text{при } m = 6 \quad \alpha > 4^\circ 35'.$$

Таким образом, вполне достаточно заточить на вершине задний угол порядка 10° , чтобы обеспечить эффективные условия резания не только с точки зрения задних углов зазора, но также и с точки зрения достаточной массивности и прочности тела резца.

Номинальная скорость резания при обработке граненых деталей вращающимися резцами складывается из окружных скоростей вращения заготовки и резца. Можно написать для среднего положения II—II (фиг. 97)

$$v = v_d + v_p.$$

Наибольшая окружная скорость вращения заготовки

$$v_d = \omega r.$$

Наибольшая окружная скорость вращения резца

$$v_p = \tau R.$$

Отношение скоростей

$$\frac{v_d}{v_p} = \frac{\omega}{\tau} \cdot \frac{r}{R} = \frac{\omega}{\tau} \eta. \quad (265)$$

При $\eta = 1/3$ имеем

$$\frac{\omega}{\tau} = \frac{1}{2,1}.$$

Подставив в уравнение (265) значения η и $\frac{\omega}{\tau}$, получим

$$\frac{v_d}{v_p} = \frac{1}{2,1} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{6,3},$$

откуда следует, что

$$v_p = 6,3 v_d.$$

Номинальная скорость резания

$$v = v_d + 6,3 v_d = 7,3 v_d.$$

т. е. номинальная скорость резания по принципиальным кинематическим схемам резания 501, 701 и 711 применительно

к обработке на их основе деталей граненого сечения примерно в 7 раз больше окружной скорости вращения заготовки.

Из рассмотренных выше условий работы вращающихся резцов вытекают нижеперечисленные основные требования, которым должен удовлетворять механизм в части кинематической цепи, связывающей движения заготовки обрабатываемой граненой детали и вращающейся резцовой головки.

Эта кинематическая цепь должна:

а) осуществить вращение заготовки и резцовой головки в одном и том же направлении;

б) обеспечить настройку любого передаточного числа i в пределах от 2 до 3;

в) обеспечить равномерное вращение с дробным передаточным числом i на протяжении всего рабочего цикла и иметь фазу замедления вращения резцовой головки за время холостого цикла с тем, чтобы суммарный угловой поворот резцовой головки за время рабочего и холостого циклов был кратен величине углового поворота обрабатываемой заготовки;

г) обеспечить равномерное осевое перемещение резцовой головки с целью сообщения ей продольной подачи s_0 мм/об.

Все перечисленные требования могут быть реализованы механизмами приспособлений или станков самых различных конструкций. В данной работе нет необходимости подробно исследовать все возможные конструктивные варианты осуществления подобных механизмов и достаточно ограничиться лишь некоторыми указаниями в этом направлении. Нам кажется, что затруднения, связанные с необходимостью обеспечения за время каждого холостого цикла фазы замедленной угловой скорости вращения резцовой головки, легче и проще преодолеть, если принцип действия механизма приблизить к условиям относительного перекатывания подвижной полоидной окружности радиуса a (инструмента) внутри неподвижной полоидной окружности радиуса b (детали).

В этом случае схема механизма сводится к внутреннему планетарному зацеплению (фиг. 101).

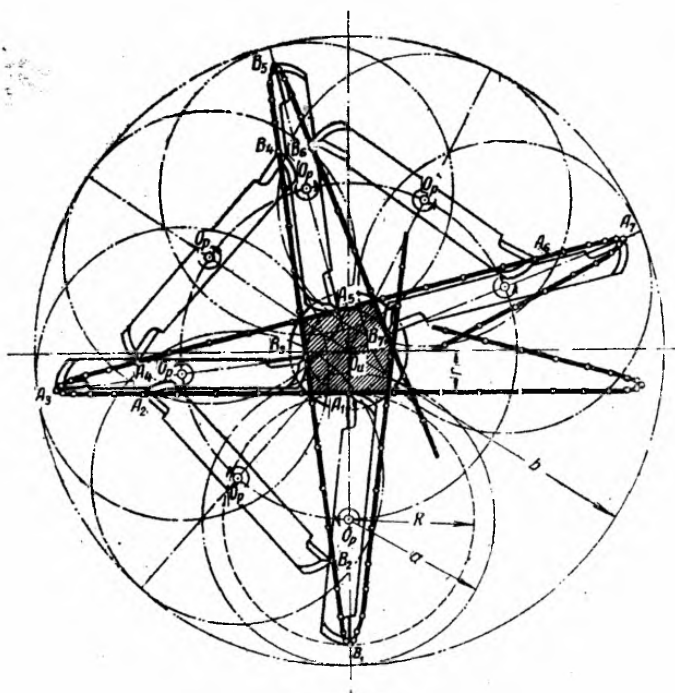
Подвижная полоидная окружность радиуса a может быть рассматриваема как делительная окружность зубчатого колеса z_1 , насаженного на общую ось с резцовой головкой, а неподвижная полоидная окружность радиуса b как делительная окружность внутреннего зубчатого колеса z_2 .

При перекатывании колеса z_1 по часовой стрелке внутри зубчатого колеса z_2 резцовая головка получает также вращение, направленное по часовой стрелке. Одновременно она перекачивается по внутреннему венцу неподвижного колеса z_2 и относительно скрепленной с этим колесом неподвижной обрабатываемой детали. Вершина каждой из двух диаметрально противоположно расположенных головок резца тогда имеет траекторией своего

относительного рабочего движения выпрямленную укороченную гипоциклоиду. Так как передаточное число

$$i = \frac{b}{a} = \frac{z_2}{z_1}$$

является числом дробным и лежит в пределах $2 < i < 3$, то отрезки выпрямленных укороченных гипоциклоидальных траекто-



Фиг. 101.

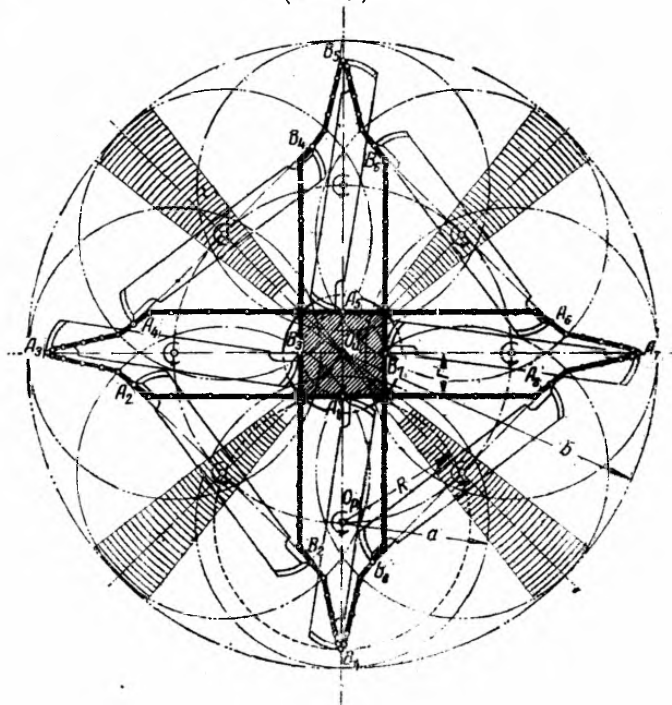
рий, описываемых относительно неподвижного изделия, не замыкаются и поэтому не образуют конфигурации необходимого профиля (фиг. 101).

Этот недостаток может быть устранен, как это уже было указано ранее, надлежащим замедлением угловой скорости вращения резцовой головки за период холостого цикла.

С введением фазы замедления незамыкающиеся ветви выпрямленной укороченной гипоциклоиды замкнутся и приобретут необходимую периодичность относительно обрабатываемых граней детали. Одновременно с этим схема на фиг. 101 переходит в схему, показанную на фиг. 102.

Периодически повторяющиеся зоны замедления, относительного вращения резцовой головки (на фиг. 102 заштрихованы) могут быть достигнуты периодически повторяющимися угловыми смещениями неподвижной полюидной окружности вокруг оси O_n на угол

$$\zeta = \left(1 - \frac{2}{i}\right) \frac{360^\circ}{m}$$



Фиг. 102.

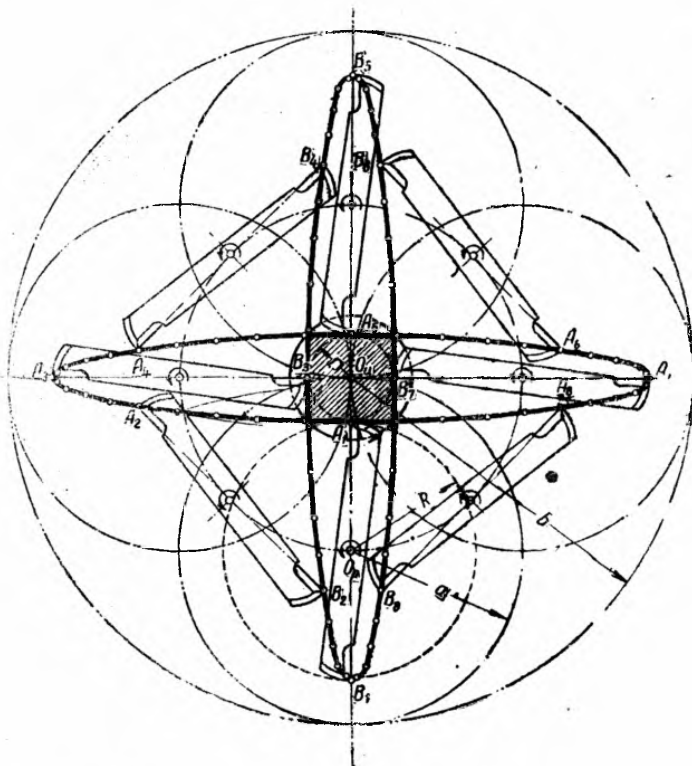
и в ту же сторону, в которую перемещается центр O_p резцовой головки.

Тогда общая схема, иллюстрирующая последовательное положение вершин двухконцевого резца, соответствует изображению, представленному на фиг. 102. Из фиг. 102 видно, что очерчиваемый контур многогранника образован двумя изолированными и смещенными одна относительно другой на угол 90° выпрямленными и взаимно параллельно расположенными замыкающимися ветвями укороченной гипоциклоиды, образующими квадрат с правильными угловыми переходами от одной сопряженной грани к другой.

Каким бы простым способом ни достигалось периодически повторяющееся смещение неподвижной полюиды на угол ζ ,

механизм, осуществляющий эти смещения, все равно должен быть более сложным, чем если бы этого смещения не было вовсе.

Поэтому, если учесть, что величина передаточного числа $i \rightarrow 2$ постепенно убывает с убыванием отношения $\eta = \frac{r}{R}$, то вполне законным является вопрос — нельзя ли при достаточно малом



Фиг. 103.

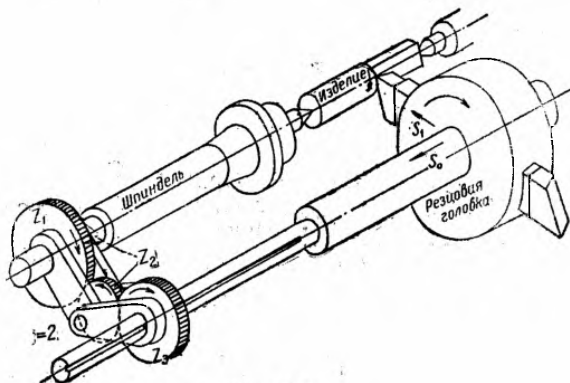
отношении η отказаться от соблюдения дробного передаточного числа i и заменить его целым и постоянным для всех случаев практики числом $i = 2$. Тогда выпрямленная укороченная гипоциклоида превратится в выпуклую замыкающуюся кривую и схема на фиг. 102 перейдет в схему на фиг. 103.

Как это видно из фиг. 103, каждая из диаметрально противоположно расположенных вершин резца во время работы описывает взаимно перпендикулярно расположенные замкнутые, слегка выпуклые, гипоциклоидальные траектории относительно рабочего движения, центральные отрезки которых являются контурными линиями, очерчивающими граненые стороны детали.

Кинематическая схема подобного упрощенного механизма показана на фиг. 104. Из фиг. 104 видно, что для получения постоянного передаточного числа $i = 2$ достаточно осуществить передачу вращения от шпинделя на резцовую головку при помощи трех шестерен.

Шестерня z_1 вращает паразитную шестерню z_2 , посаженную на ось, соединяющую концы четырех серег, противоположные концы которых надеты у двух серег на ось шпинделя (заготовки), а у двух других серег на ось резцовой головки.

Паразитная шестерня z_2 в свою очередь вращает шестерню z_3 , закрепленную на валу резцовой головки, и сообщает последней то же направление вращения, что и обрабатываемой детали.



Фиг. 104.

Для решения вопроса о том, в какой мере подобное упрощение кинематической схемы механизма может удовлетворить требованиям точности обработки граненых поверхностей, необходимо подвергнуть дополнительному исследованию кривизну обработанных таким способом граней многогранника.

Для этого на фиг. 105 обозначим расстояние от центра O_p резцовой головки до вершины резца в точке M через e .

Зная передаточное число i , радиус подвижной полоидной окружности можем выразить уравнением

$$a = \frac{R_0}{i-1}, \quad (266)$$

где R_0 — радиус окружности, по которой перемещается центр O_p подвижной полоиды.

Подсчитав по уравнению (266) радиус a полоиды, радиус неподвижной полоиды можем выразить как

$$b = ia. \quad (267)$$

Так как полоиды перекатываются без скольжения, то

$$a\varphi = b\omega, \quad (268)$$

откуда

$$\varphi = \frac{b}{a} \omega.$$

Из уравнения (268) и из расчетной схемы на фиг. 105 следует, что координаты x и y укороченной гипоциклоиды

$$\left. \begin{aligned} x &= (b-a) \cos \omega - e \cos \left(\frac{b-a}{a} \omega \right); \\ y &= (b-a) \sin \omega + e \sin \left(\frac{b-a}{a} \omega \right). \end{aligned} \right\} \quad (269)$$

Наибольшая стрела выпуклости Δx равна разности абсцисс x_0 для средней точки на боковой стороне граненой детали и x_1 для угловой точки на этой же боковой стороне.

Абсциссе x_0 соответствует угловой поворот $\omega = 0$, следовательно, при $\frac{b}{a} = 2$ по уравнению (269)

$$x_0 = a - e. \quad (270)$$

Ордината y для крайней угловой точки боковой стороны равна

$$y = r \sin \frac{180}{m}.$$

Тогда уравнение (269) можно написать для случая $\frac{b}{a} = 2$

$$y = r \sin \frac{180}{m} = (a + e) \sin \omega_1,$$

откуда угловой поворот

$$\omega_1 = \arcsin \left(\frac{r \sin \frac{180}{m}}{a + e} \right). \quad (271)$$

Если предположить, что угол ω_1 известен по уравнению (271), то уравнение (269) абсциссы для угловой точки боковой стороны граненой детали дает

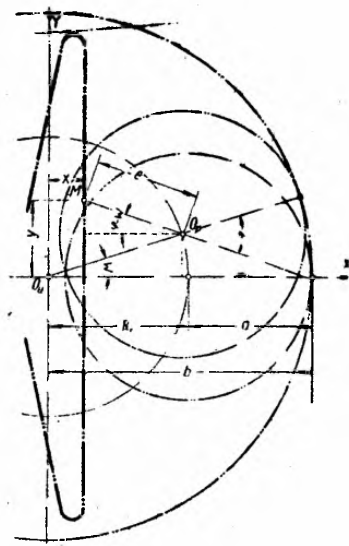
$$x_1 = (a - e) \cos \omega_1. \quad (272)$$

Наибольшая стрела выпуклости линии, очерчивающей контур граненой стороны, обработанной при передаточном числе $i = \frac{b}{a} = 2$, будет тогда

$$\Delta x = x_0 - x_1 = (a - e)(1 - \cos \omega_1). \quad (273)$$

Радиус кривизны выпуклой стороны выражается уравнением

$$\rho = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}}. \quad (274)$$



Фиг. 105.

Дифференцируя уравнение (269) по параметру ω , имеем:

$$\frac{dx}{d\omega} = -(b-a) \sin \omega + e \left(\frac{b-a}{a} \right) \sin \left(\frac{b-a}{a} \omega \right);$$

$$\frac{dy}{d\omega} = (b-a) \cos \omega + e \left(\frac{b-a}{a} \right) \cos \left(\frac{b-a}{a} \omega \right).$$

Тогда

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\cos \omega + \frac{e}{a} \cos \left(\frac{b-a}{a} \omega \right)}{-\sin \omega + \frac{e}{a} \sin \left(\frac{b-a}{a} \omega \right)}.$$

Полагая отношение $\frac{b}{a} = 2$, имеем:

$$\frac{dx}{d\omega} = (e-a) \sin \omega;$$

$$\frac{dy}{d\omega} = (e+a) \cos \omega;$$

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{\cos \omega + \frac{e}{a} \cos \omega}{\sin \omega + \frac{e}{a} \sin \omega} = -\frac{e+a}{(e-a) \operatorname{tg} \omega}. \quad (275)$$

Вторые производные от уравнения (269)

$$\frac{d^2x}{d\omega^2} = -(b-a) \cos \omega + e \left(\frac{b-a}{a} \right)^2 \cos \left(\frac{b-a}{a} \omega \right);$$

$$\frac{d^2y}{d\omega^2} = -(b-a) \sin \omega - e \left(\frac{b-a}{a} \right)^2 \sin \left(\frac{b-a}{a} \omega \right).$$

Если отношение $\frac{b}{a} = 2$, то имеем

$$\frac{d^2x}{d\omega^2} = (e-a) \cos \omega;$$

$$\frac{d^2y}{d\omega^2} = -(e+a) \sin \omega;$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2y}{dx^2} &= \frac{-(e+a) \sin^2 \omega (e-a) - (e-a)(e+a) \cos^2 \omega}{(e-a)^3 \sin^3 \omega} = \\ &= -\frac{e+a}{(e-a)^2 \sin^3 \omega}. \end{aligned} \quad (276)$$

Подставив найденные по уравнениям (275) и (276) значения $\frac{dy}{dx}$ и $\frac{d^2y}{dx^2}$ в уравнение (274), получаем выражение радиуса кривизны выпуклых боковых сторон многогранников, обработанных

упрощенным механизмом (фиг. 104) при постоянном передаточном числе $i = \frac{b}{a} = 2$:

$$\rho = \frac{\left[1 + \frac{(e+a)^2}{(e-a)^2 \operatorname{tg}^2 \omega} \right]^{3/2}}{e+a} = - \frac{\cos^3 \omega [(e-a)^2 \operatorname{tg}^2 \omega + (e+a)^2]^{3/2}}{(e-a)(e+a)}$$

Для средней точки стороны многогранника $\omega = 0$ и поэтому для этой точки уравнение (277) изменяется:

$$\rho = \frac{(e+a)^2}{(a-e)}.$$

Некоторое представление о кривизне и величине стрелы выпуклой контурной линии, очерчивающей профиль многогранника, при пользовании упрощенным механизмом (фиг. 104) и цифровые величины, подсчитанные для нескольких частных случаев по уравнениям (273) и (278). Эти величины приведены в табл. 15.

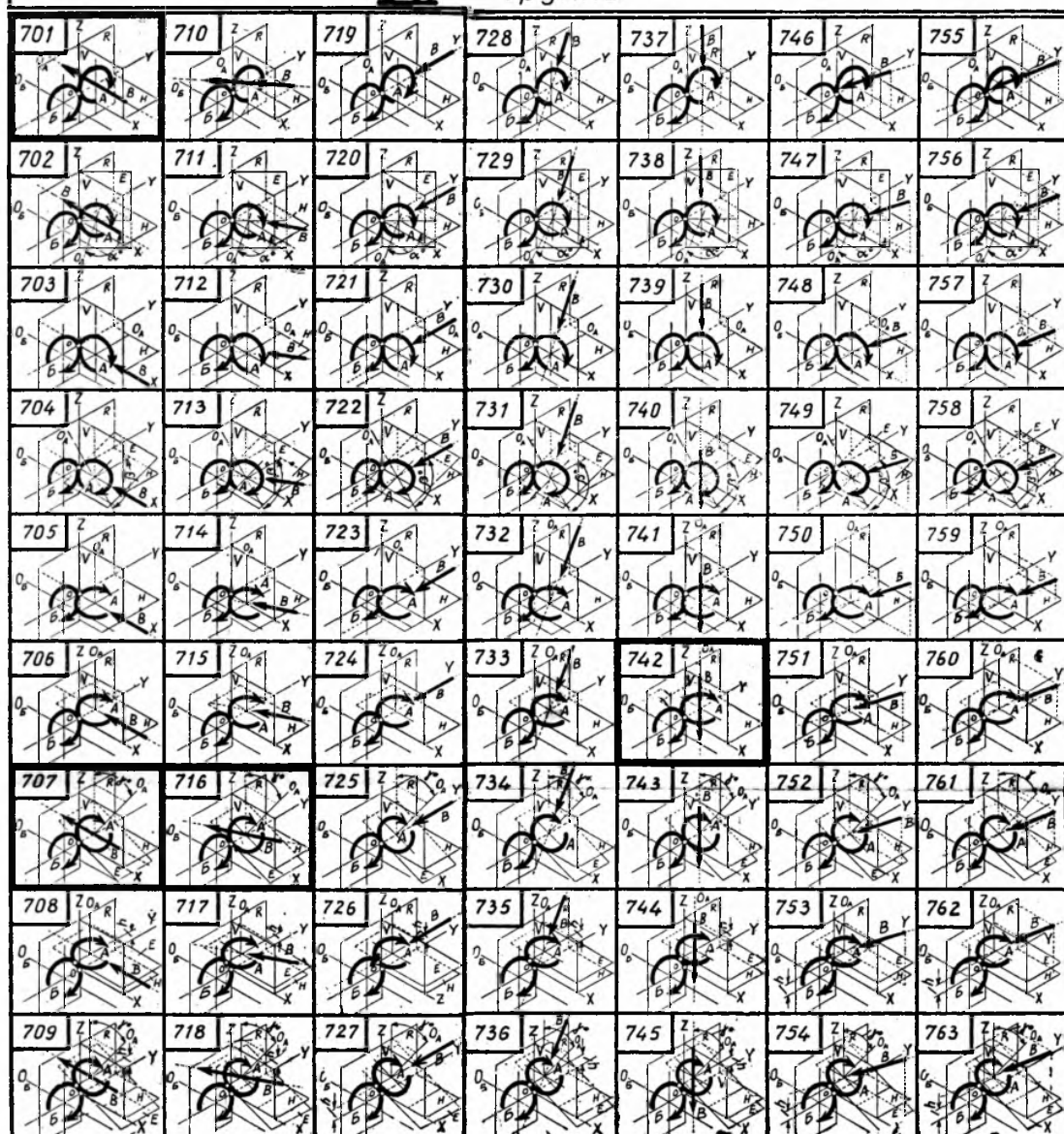
Таблица

m	$\eta = \frac{r}{R}$	i	R	r	L	a	b	Δx в мм	ρ в мм
4	$1/3$	2,10	50	16,7	156	142	298	0,17	40
	$1/4$	2,08	50	12,5	193	204	500	0,09	41
6	$1/3$	2,13	50	16,7	180	139	344	0,11	40
	$1/4$	2,10	50	12,5	250	227	477	0,05	43

Из приведенных в табл. 15 цифровых величин стрелы выпуклости Δx видно, что они укладываются в допуски на обработку деталей по 3—4 классу точности, что соответствует обычным средним техническим требованиям, предъявляемым к обработке деталей в машиностроительной промышленности. Это дает основание считать, что предлагаемый упрощенный механизм (фиг. 104) удовлетворяет требованиям заводской практики и может быть использован как приспособление, монтируемое на универсальном токарном автомате или революционном станке и как рабочий механизм станка специального назначения.

VII

Группа



ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
10	13-я снизу	b	B	Тип.
99	Формула (95)	$F = s \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - t\right)^2 \sin^2(\lambda' \pm \varepsilon) - \left(\frac{D}{2} - t\right) \cos(\lambda' \pm \varepsilon)}$	$F = s \left[\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - t\right)^2 \sin^2(\lambda' \pm \varepsilon) - \left(\frac{D}{2} - t\right) \cos(\lambda' \pm \varepsilon)} \right]$	Корр.
139	11-я сверху, в знаменателе	$(\rho L + L)^2$	$(\rho + L)^2$	Тип.
139	6-я снизу	$\omega = \frac{360 \cdot S}{2\pi\rho}$	$\omega = \frac{360 \cdot S \cdot n_x}{2 \cdot \pi\rho}$	Авт.
170	18-я сверху	$z^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi = \operatorname{tg} \gamma (R_0^2 - z^2) =$	$z^2 \operatorname{ctg}^2 \varphi = \operatorname{tg}^2 \gamma (R^2 - z^2) =$	Корр.

В книге рассматриваются основы кинематики резания; анализируются и классифицируются возможные принципиальные кинематические схемы резания, выражающие все движения, сообщаемые механизмом станка как инструменту, так и детали, а также формулируются определения геометрических параметров в состоянии движения, предопределяющие процесс резания, износ и стойкость металлорежущих инструментов.

В работе даны основы научного метода исследования кинематических схем резания, а также критерии для выбора наиболее рентабельных схем на основе этого исследования. Кроме того, приведены данные, необходимые для конструирования режущих инструментов на базе кинематики резания.

Книга рассчитана на инженеров промышленных предприятий, работников научно-исследовательских учреждений, а также учащихся вузов машиностроительных специальностей.

Редактор П. В. Кондратьев

**Главная редакция
литературы по металлообработке и станкостроению
Главный редактор инж. Р. Д. БЕЙЗЕЛЬМАН**

Техн. редактор **С. И. Ермачков**

Корректор **Д. С. Соморова**

Обложка художника **А. Е. Гребенщикова**

Сдано в производство 20/IX 1947 г. Подпис. к печати 25/II 1948 г. Тираж 5000 экз.
А 01724 Печ. л. 12,5 Уч.-изд. л. 13,5. Бумага 60X92/16. Цена книги 9 р., пер. 2 р. Зак. № 2152

1-я типография Машгиза, Ленинград, ул. Мойсенко, 10.

11 руб



Машгиз, Москва, Гретьяковский проезд, 1