

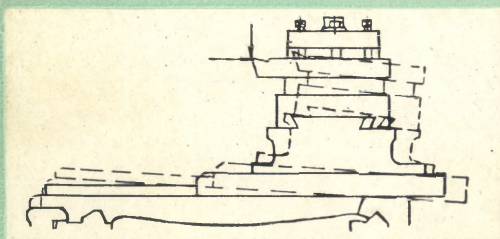
БИБЛИОТЕЧКА



ТОКАРЯ - НОВАТОРА

Выпуск 9

И.С. АМОСОВ, В.А. СКРАГАН



**ТОЧНОСТЬ, ВИБРАЦИИ
И ЧИСТОТА ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ ТОКАРНОЙ
ОБРАБОТКЕ**

МАШГИЗ



ВЫПУСК 9

Канд. техн. наук доц. И. С. АМОСОВ
Канд. техн. наук доц. В. А. СКРАГАН

ТОЧНОСТЬ, ВИБРАЦИИ И ЧИСТОТА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРЕБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Под общей редакцией
канд. техн. наук доц. М. А. АНЦЕРОВА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

В серии брошюр второго издания библиотечки токаря-новатора в обобщенном и систематизированном виде излагаются последние достижения в области оборудования и технологии токарной обработки.

Со времени выхода в свет первого издания библиотечки (1953 г.) в практику токарной обработки внесено много нового (гидравлические копируемые суппорты, улучшенные конструкции приспособлений, новые приемы обработки и т.д.), в связи с чем материал был подвергнут коренной переработке. Кроме того, заново написаны брошюры по обработке деталей на крупных токарных и токарно-карусельных станках.

Библиотечка рассчитана на квалифицированных токарей; она может также служить пособием для слушателей курсов повышения квалификации и учащихся технических и ремесленных училищ.

Все выпуски библиотечки (перечень см. в конце брошюры) написаны членами Технологического комитета Ленинградского областного правления НТО Машпрома.

В настоящей брошюре в первой главе рассматриваются причины, влияющие на точность обработки деталей на станках, и пути повышения точности.

Во второй главе рассматриваются причины возникновения вибраций при точении и методы борьбы с ними

Третья глава посвящена вопросам чистоты поверхности.

Рецензент канд. техн. наук доц. *А. А. МАТАЛИН*

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА

Редакция литературы по технологии машиностроения.

Заведующий редакцией инж. *Е. П. НАУМОВ*

ГЛАВА I

ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ

1. Точность обработки

Рассчитывая и проектируя детали машин, конструктор придает им определенные формы и размеры. Однако в процессе изготовления деталей на металлорежущих станках нельзя получить их абсолютно точными. Возникают погрешности в размерах, форме поверхностей и взаимном их расположении.

Чем меньше эти погрешности, тем выше эксплуатационные качества деталей, но тем сложнее и дороже их изготовление.

Чтобы погрешности изготовления находились в допустимых пределах (исходя из необходимых эксплуатационных свойств деталей и соединений), на размеры деталей устанавливаются допуски, которые ограничивают возможные отклонения (погрешности) от установленных размеров и форм.

Погрешности формы поверхностей могут быть самые разнообразные: конусность, овальность, эллиптичность, корсетность, волнистость и т. п. Если нет специальных указаний на чертеже, то погрешность формы возможна в пределах поля допуска на размер. В ряде случаев, при необходимости более точного соблюдения формы поверхности, это оговаривается специальными указаниями.

Точность взаимного расположения поверхностей: параллельность, перпендикулярность, соосность и т. п. — также указывается в виде допусков и отклонений.

Нормальной точностью изготовления на токарных станках обычно считают точность 4—3-го класса. Однако при необходимости и благоприятных условиях можно получить 2-й класс и даже 1-й, но стоимость обработки будет высокой. Точная обработка на токарном станке возможна только при исправном оборудовании и высокой квалификации исполнителя.

Для достижения точной обработки всегда необходимо отчетливо представлять причины возникновения неточностей (погрешностей) обработки. Советскими учеными проведен ряд исследований в области точности механической обработки, в результате которых

вскрыты причины появления отдельных погрешностей обработки; найдены факторы, влияющие на эти погрешности, и намечены пути повышения точности механической обработки.

Физическая сущность явлений, имеющих место при механической обработке, сложна, а поэтому и погрешности механической обработки многообразны.

Погрешности обработки возникают: вследствие неточности оборудования и инструмента, от упругих деформаций узлов станка и инструмента, от износа инструмента, от температурных деформаций, от неточности установки и настройки и проч.

Для изучения этих погрешностей обычно используются теоретические расчеты, результаты экспериментальных исследований и богатый опыт нашего отечественного машиностроения.

В настоящей главе рассматриваются вопросы точности механической обработки при чистовом скоростном точении твердосплавными инструментами.

Если обработать на токарном станке вал большого диаметра и большой длины и после обработки тщательно его промерить, то обнаружится, что в самом начале обработки деталь уже имеет какое-то отступление от заданного размера. Мало того, по всей длине обработки размер детали все время будет изменяться. Если, например, обрабатывается вал по наружному диаметру, то, строго говоря, вал будет нецилиндричным. Эти отступления поверхности обработанного вала от заданного размера и правильной цилиндрической формы вызваны влиянием погрешностей обработки.

Если обработать партию мелкогабаритных деталей (например, обточить по наружному диаметру валики или втулки), причем обработку произвести установленным резцом (станок настроен на проточку наружного диаметра партии деталей) и после обработки всю партию деталей точно промерить, то обнаружится, что размеры всех деталей разные. Кроме того, размеры каждой детали по длине обработки, например, в начале и конце детали, будут разными. Разность в размерах отдельных деталей и разность в размерах одной и той же детали (погрешность формы) объясняются опять-таки действием погрешностей механической обработки.

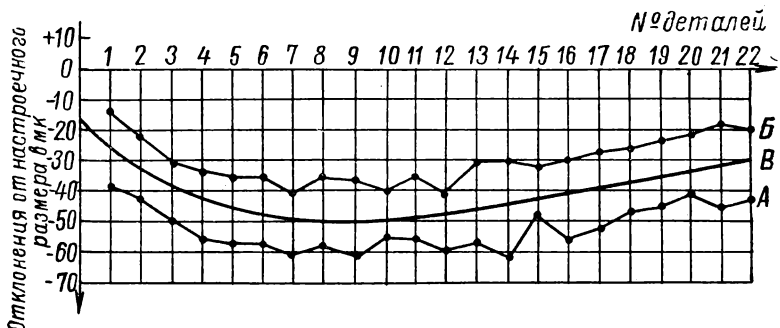
На фиг. 1 представлена кривая изменения размеров партии деталей, обработанных на токарном станке. На станке с ВЦ (высотой центров) 380 мм обрабатывались кольца из стали 35ХМ ($H_B = 320$) диаметром 204 мм и шириной 60 мм. Резец сечением 20×30 мм оснащен пластинкой твердого сплава Т15К6. Обработка колец производилась установленным резцом.

На кривой по горизонтальной оси (оси абсцисс) отложены порядковые номера обработанных деталей. По вертикальной оси (оси ординат) отложены отклонения обтачиваемых деталей в микронах от настроенного размера, т. е. наружного диаметра, равного 204 мм.

На фиг. 1 точки на кривой А соответствуют размерам отдельных деталей в начале их обработки, а точки на кривой Б — размерам в конце обработки. Ломаные линии А и Б получены путем соединения опытных точек.

Рассматривая кривые, можно сделать несколько общих выводов:

- 1) начальный размер первой изготавливаемой детали не совпадает с желательным настроечным размером;
- 2) начальный и конечный размеры деталей не равны, т. е. все детали имеют какую-то погрешность формы; эта погрешность формы (разность размеров) более или менее одинакова у всех обрабатываемых деталей;
- 3) изменение размеров деталей по мере увеличения порядкового номера детали, т. е. по мере увеличения длительности процесса

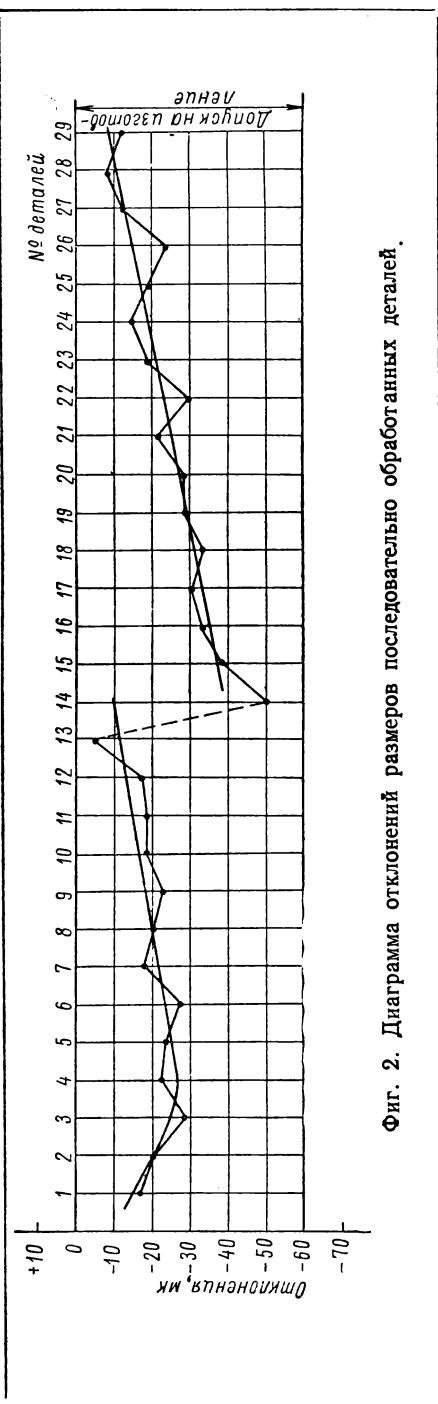


Фиг. 1. Диаграмма отклонений размеров последовательно обработанных колец от номинального размера.

обработки партии деталей, подчиняется определенной закономерности; для более четкого выяснения этой закономерности приведена кривая *В*, которая является сглаженной кривой средних размеров отдельных деталей; рассматривая кривую *В*, мы можем отметить общую закономерность: в начале обработки партии деталей, приблизительно до 7—9-й детали, их средний размер (наружный диаметр) уменьшается, а затем до последней 22-й детали партии средний размер все время увеличивается;

4) обе основные линии как *А*, так и *Б* не являются плавными кривыми, а представляют собой ломаные линии, что указывает на рассеяние размеров отдельных деталей, т. е. на наличие случайных погрешностей обработки.

Кривые, представленные на фиг. 1, дают ясное представление о наличии сложных зависимостей точности механической обработки деталей от факторов технологического процесса. Часть этих факторов носит случайный характер, не подчиняясь видимым закономерностям, а часть оказывает влияние на точность механической обработки в совершенно определенном направлении и в определенной строгой закономерности (систематические погрешности изготовления). В процессе механической обработки данной детали или партии деталей отдельные погрешности изготовления оказывают, каждая по-своему, влияние на точность изготовления. В итоге общего совместного действия этих погрешностей (суммирования погрешностей) получается искажение формы и размеров окончательно



Фиг. 2. Диаграмма отклонений размеров последовательно обработанных деталей.

изготовленной детали. Действуя одновременно, погрешности изготовления частично уничтожают, частично дополняют друг друга.

Чтобы иметь ясное представление о том, что же получается с размером и формой обрабатываемой детали при одновременном действии всех погрешностей, необходимо их просуммировать, но для этого нужно знать их величину и от чего, т. е. от каких условий технологического процесса, зависят эти погрешности.

При обработке детали на станке, в частности, на токарном станке, мы имеем дело с технологической системой, т. е. с системой станок — деталь — инструмент. Очевидно, что погрешности обработки зависят от начального положения этой системы (от настройки) и от изменения каких-либо частей системы в процессе обработки. Причем как начальная установка системы, так и ее изменения в процессе обработки могут зависеть от исполнителя работы, но могут от него и не зависеть. Во всяком случае, зная характер этих изменений в процессе обработки, исполнитель, как правило, может на них воздействовать для уменьшения отдельных погрешностей изготовления.

На фиг. 2 приведены аналогичные кривые, но при обработке на токарном станке других деталей и в других условиях. Здесь, как и ранее, точками по вертикальной оси отложены размеры обрабатываемых деталей, но не два размера, а один средний размер детали. Сплошные плавные линии пред-

ставляют собой сглаженную кривую размеров деталей. Как видим, основные закономерности здесь те же, что и на фиг. 1.

Однако после изготовления 13 деталей в данном случае появилась угроза получения брака, и поэтому была произведена поднастройка инструмента, после чего было изготовлено еще 16 деталей. Если знать заранее закономерности изменения размеров деталей, то, очевидно, можно предвидеть момент предельного нарастания размеров и тем самым значительно упростить технологический процесс и контрольные операции. В этом случае как настройку, так и поднастройку станков можно производить более точно и по заранее составленной программе технологического процесса. В данном случае технолог, мастер или настройщик будут действовать не вслепую (основываясь только на данных измерения деталей), а на основе соответствующего технологического расчета. Особо большое значение такие расчеты приобретают в условиях автоматизации производства и, в частности, в условиях механизации и автоматизации токарных станков.

Расчеты точности изготовления дают возможность предвидеть течение всего технологического процесса. В настоящей главе рассмотрены основные погрешности изготовления, связанные с работой станка, инструмента и обрабатываемой деталью.

Приводимые ниже цифры и закономерности основываются на большом количестве экспериментального материала, но все же их не следует рассматривать как нормативные; в каждом частном случае, в зависимости от условий технологического процесса, они могут несколько изменяться.

2. Погрешности, связанные с работой токарного станка

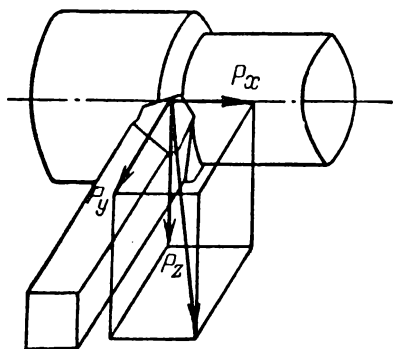
Все новые металлорежущие станки заводом-изготовителем проверяются на геометрическую точность, т. е. на точность в ненагруженном состоянии по ГОСТ 42—40. Проверяются они также после каждого ремонта и в процессе эксплуатации. Несмотря на высокую точность изготовления, все станки имеют погрешности изготовления узлов и их взаимного расположения; чем меньше эти погрешности, тем точнее станки.

Предусмотренные ГОСТ проверки в основном контролируют точность выполнения и сборки отдельных узлов, а также станка в целом, но прямо не характеризуют погрешности обработки на этих станках. Для определения погрешности обработки, на основании известной геометрической погрешности самого станка, в некоторых случаях требуется производить специальные пересчеты. Например: прямолинейность и параллельность направляющих токарных станков характеризуют погрешности нижней части супорта, а для определения погрешности формы обрабатываемой детали необходим пересчет и т. п.

Однако такие пересчеты несложны и производятся достаточно просто. Зная геометрическую точность станка, можно рассчитать погрешность обработки, вызываемую ими.

Рассчитывать погрешности изготовления деталей на основании общих норм точности станков не рекомендуется. Конкретный станок, находящийся в эксплуатации, может иметь большие или меньшие погрешности по сравнению с предусмотренными ГОСТ. Работаящие станки изнашиваются, расшатываются и вследствие этого теряют свою первоначальную точность. Износ направляющих токарных станков при плохой эксплуатации их происходит быстро, причем неравномерно по длине.

Наличие геометрических погрешностей станков приводит к искажению формы (погрешности формы) в продольном и поперечном сечениях обрабатываемой детали. Однако при правильной эксплуатации и уходе за станками искажения формы деталей, возникающие от геометрической неточности станков, очень небольшие.



Фиг. 3. Действие составляющих силы резания на резец.

Наличия и качества установочных приспособлений и измерительного инструмента. Некоторые из этих погрешностей будут рассмотрены ниже.

Все эти погрешности непосредственно не связаны с процессом резания и, как правило, от него не зависят. *В целях уменьшения погрешностей изготовления необходимо внимательно следить за правильной эксплуатацией станков, приспособлений и инструмента.*

Жесткость токарных станков. Что же происходит во время работы станка?

Во время обработки детали снимается стружка и возникает сила резания, действующая с одной стороны, на резец и супорт станка, а с другой — на обрабатываемую деталь и через нее на переднюю и заднюю бабки.

Действие составляющих силы резания на резец показано на фиг. 3. На деталь они действуют в обратном направлении. Под действием этих сил узлы станка деформируются. При этом деталь отжимается от резца, за счет отжатия бабок, а резец — от детали, за счет отжатия супорта. В результате этих общих отжатий изменяется расстояние от оси детали до вершины резца, т. е. изменяется размер обрабатываемой детали.

Составляющие силы резания действуют в трех направлениях: P_z , P_y и P_x (фиг. 3). Однако основное влияние на упругие деформа-

ции узлов станка оказывают две составляющие силы резания P_y и P_z .

С точки зрения точности механической обработки представляет интерес перемещение узлов станка в направлении, влияющем на размер обрабатываемой детали, поэтому в технологии машиностроения обычно рассматривают только перемещения в направлении действия составляющей силы резания P_y , т. е. в направлении, нормальном (перпендикулярном) к обрабатываемой поверхности. Только перемещения в этом направлении оказывают заметное влияние на размер обрабатываемой детали. Если перемещение узлов станка в нормальном направлении равно $0,1$ мм, то диаметр детали в этом случае увеличится на $0,2$ мм.

Способность узлов станка или станка в целом сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать, называется жесткостью.

Чем больше жесткость, тем меньше перемещения и, следовательно, меньше погрешности от упругих деформаций. Хотя действие составляющей силы резания P_z на упругие деформации велико, но основное влияние (как правило) имеет составляющая P_y , поэтому для упрощения расчетов в технологии машиностроения жесткость численно определяется как отношение нормальной составляющей силы резания P_y к деформации y , отсчитываемой в направлении действия этой же составляющей:

$$j = \frac{P_y}{y} \text{ кг/мм},$$

где j — жесткость станка или узла станка в кг/мм;

P_y — нормальная (радиальная) составляющая силы резания в кг;

y — деформация станка или узла станка, измеряемая в направлении действия P_y в мм.

При этом, однако, необходимо помнить, что хотя жесткость и рассчитывается по одной составляющей, но испытание жесткости станков необходимо проводить при действии не менее чем двух составляющих сил резания P_y и P_z , так как действие вертикальной составляющей имеет большое значение и в ряде случаев существенно меняет картину упругих деформаций узлов станка, что будет видно из дальнейшего.

Жесткость станка характеризует сопротивляемость его действию усилий. Например, если известно, что жесткость станка $j = 2000$ кг/мм, а при снятии стружки действует составляющая силы резания $P_y = 200$ кг, то отжим узлов станка составит $0,1$ мм, т. е. расстояние от вершины резца до обработанной поверхности изменится на $0,1$ мм, а диаметр обрабатываемой детали в этом сечении соответственно изменится на $0,2$ мм. Если составляющая силы резания $P_y = 20$ кг, то по такому же расчету отжим узлов станка будет равен $0,01$ мм, а диаметр обтачиваемой детали изменится на $0,02$ мм.

Погрешности от упругих деформаций имеют большое значение для точности механической обработки и составляют от 20 до 80% общей погрешности обработки.

Кроме того, жесткость станков оказывает большое влияние на вибрации. При работе на станках с малой жесткостью вибрации появляются значительно раньше, при менее напряженных режимах резания.

От чего же зависит жесткость токарных станков и как она влияет на точность изготовления деталей?

Экспериментальными исследованиями установлено, что жесткость металлорежущих станков, в основном, обусловлена не сопротивлением деформациям самих деталей станка, а сопротивлением деформациям соединений отдельных узлов и деталей. Эти деформации зависят от деформаций крепежных и соединяющих деталей, а также от деформаций самих поверхностей соединяемых деталей — контактных деформаций.

Полный теоретический расчет жесткости станков в настоящее время не представляется возможным произвести, но разработано несколько методов экспериментального определения жесткости, причем может определяться жесткость как станка в целом, так и его отдельных узлов.

Методика испытания жесткости станков сводится к тому, что узлы станка нагружаются силами, воспроизводящими действие сил резания, и одновременно измеряются перемещения узлов станка.

При производственном методе испытания жесткость станков определяется в рабочем состоянии станка, т. е. во время резания, а при статическом — в неподвижном.

Жесткость токарного станка в случае обработки в центрах сводится к жесткости супорта, задней и передней бабок, а при обработке в патроне — к жесткости супорта и передней бабки.

Деформации отдельных узлов токарного станка неодинаково отражаются на точности обработки.

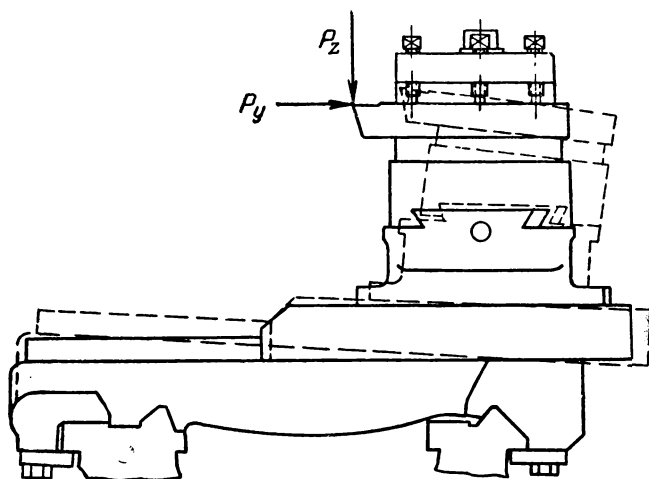
При обработке в центрах отжатие супорта при постоянной нагрузке (т. е. при постоянном припуске и однородном материале обрабатываемой детали) постоянно по всей длине обрабатываемой детали. Таким образом, отжатие супорта приводит к погрешности размера обрабатываемой детали и не влияет на ее форму. Зная жесткость супорта и нагрузку при резании, можно рассчитать величину упругого отжатия и на соответствующую величину скорректировать настройку станка на размер.

Необходимо отметить, что, как правило, влияние составляющей силы резания P_y на деформацию супорта больше, нежели составляющей P_z , а поэтому деформация происходит в направлении увеличения размера (при наружном обтачивании), как это показано на фиг. 4. Однако в отдельных случаях при относительно большом значении составляющей P_z и малом диаметре обработки могут быть такие условия, при которых деформация супорта будет происходить в обратном направлении, т. е. в направлении уменьшения размера (от рабочего). Это будет случай так называемой отрицательной жесткости, когда составляющая силы резания P_y направлена в одну сторону, а деформация узла в обратную сторону. Таким образом,

иногда сказывается влияние составляющей силы резания P_z на жесткость узла супорта.

Возможность получения отрицательной жесткости на токарных станках доказывается как теоретическими расчетами и экспериментальными исследованиями, так и практикой работы на токарных станках (случаи «клевания резцов», «затягивания»).

Работа на токарном станке в условиях отрицательной жесткости неустойчива, так как ввиду наличия зазоров в подвижных соединениях супорта перемещения «на изделие» могут быть резкими и значи-



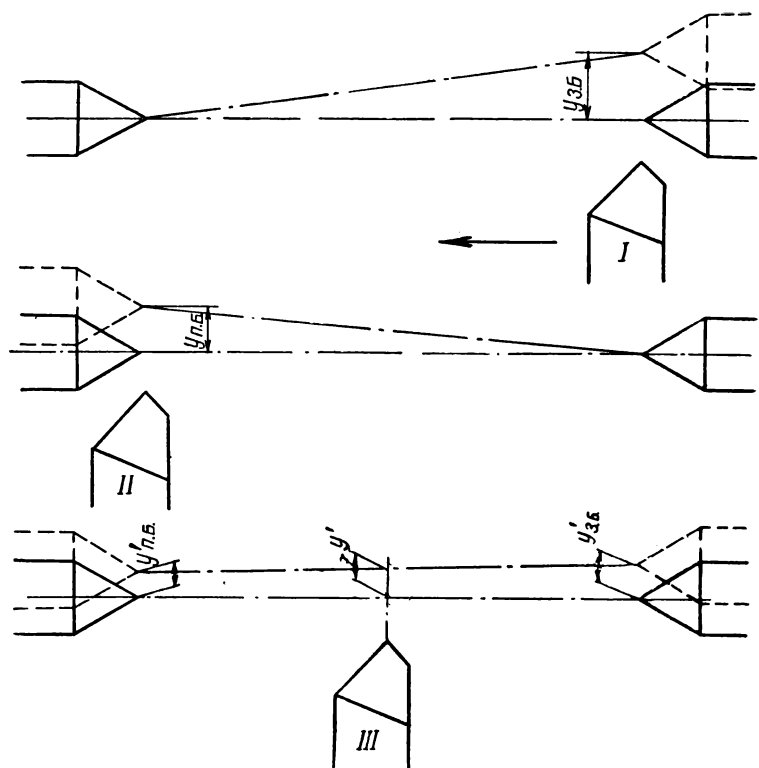
Фиг. 4. Деформация супорта токарного станка.

тельными, приводящими к дефектам обрабатываемой поверхности, а иногда и к поломкам резца.

Выше уже указывалось, что упругие деформации супорта не изменяются по длине обработки, т. е. влияют только на погрешности размера, а не на погрешности формы обрабатываемого изделия.

Совсем иначе обстоит дело с влиянием упругих отжати́й бабок на размер обрабатываемой детали. Рассматривая схему обработки в центрах (фиг. 5), мы видим, что в начале обработки (положение I) усилие резания действует исключительно на заднюю бабку и положение линии центров обусловлено только отжатием задней бабки $y_{з.б.}$. В конце обработки (положение II) усилие резания действует только на переднюю бабку, и положение линии центров зависит лишь от ее отжати́я $y_{п.б.}$. Во всех промежуточных положениях смещения линии центров обуславливаются перемещением как передней, так и задней бабок, причем по мере продвижения резца вдоль обрабатываемого изделия влияние смещения задней бабки на положение линии центров уменьшается, а влияние передней бабки увеличивается.

При положении резца в середине обрабатываемой детали на переднюю и заднюю бабки действует только половина величины усилия $\left(\frac{Py}{2}\right)$, а поэтому бабки отжимаются также на величину в два раза меньшую $y'_{з.б}$ и $y'_{п.б}$. Кроме того, при этом среднем положении:



Фиг. 5. Изменение положения линии центров токарного станка по мере продвижения резца вдоль заготовки при обтачивании жесткого вала в центрах:

- I* — при положении резца против заднего центра;
II — при положении резца против переднего центра;
III — при положении резца в середине обрабатываемой заготовки.

резца отжатие бабок отражается на суммарной погрешности не всей своей величиной, а половиной, т. е.

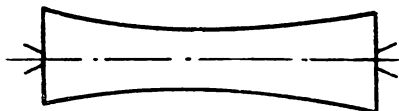
$$y' = \frac{y'_{з.б}}{2} + \frac{y'_{п.б}}{2}.$$

В итоге получается, что изменение диаметра вследствие отжатия бабок при положении резца на середине длины обрабатываемой детали значительно меньше, чем при положении у краев детали, и обтачиваемый вал имеет корсетную форму (фиг. 6). Непостоянство смещения бабок по длине обработки приводит к погрешности формы обрабатываемой детали.

Следовательно, если в центрах токарного станка обрабатывается вал, который сам практически не прогибается, то и тогда форма этого вала в продольном сечении будет не прямолинейна. Зная жесткость бабок и величину действующих усилий резания, можно рассчитать погрешность формы обрабатываемого вала.

Возвращаясь к кривым точности партии деталей (фиг. 1—2), можно установить, что отжатия узлов станка приводят как к изменению начального размера деталей, так и к погрешности их формы. Необходимо отметить, что при наличии разных припусков у заготовок, эти размеры будут изменяться не одинаково у разных деталей за счет разных отжатий узлов станка.

Для сравнения отдельных станков по жесткости при обработке в центрах принято считать за жесткость токарного станка жесткость его в середине обрабатываемой заготовки (положение III). Однако в целях более подробной характеристики станка часто определяют жесткость токарных станков в трех положениях: у задней бабки, у передней бабки и в середине обрабатываемой заготовки.



Фиг. 6. Искажение формы вала за счет упругих деформаций бабок токарного станка.

В последнее время бывшим МС и ИП СССР разработаны нормативы жесткости токарных станков, предусматривающие статическое испытание при действии силы под углом 60° , т. е. при отношении $\frac{P_y}{P_z} = 0,58$. Измерение жесткости производится в двух положениях: у передней и задней бабок. Рекомендуемые нормативами (нормаль Н71—1) нормы жесткости $j = \frac{P_y}{y}$ кг/мм указаны в табл. 1.

В табл. 2 помещены результаты заводских производственных испытаний жесткости токарных станков с ВЦ = 200—300 мм. Испытания производились производственным методом определения жесткости, т. е. на работающем станке, при обтачивании эксцентричной заготовки.

Как видно из таблицы, в среднем жесткость находящихся в эксплуатации токарных станков с ВЦ = 200 ÷ 300 мм колеблется около $j = 1000—2000$ кг/мм и в отдельных случаях достигает величины

Таблица 1

Нормы жесткости токарных станков

Для станков с наибольшим диаметром обрабатываемого изделия в мм		200	250	320	400	500	630	800
Жесткость в кг/мм	у шпинделя	1000	1075	1175	1330	1430	1550	1700
	у пиноли	770	875	950	1040	1145	1190	1310

Данные результатов испытания жесткости j токарных станков

Жесткость в кг/мм	Количество станков		
	j у передней бабки	j в середине заготовки	j у задней бабки
До 1000	15	8	9
Св. 1000 до 2000	38	24	17
Св. 2000 до 3000	7	22	15
Св. 3000 до 4000	6	5	11
Св. 4000 до 5000	2	6	9
Свыше 5000	0	5	6

$j = 5000$ кг/мм; последнее указывает на большие возможности повышения жесткости токарных станков.

При патронной обработке задняя бабка не участвует в работе станка, и смещение узлов складывается из отжатия супорта и передней бабки. Отжатие супорта постоянно при постоянной силе резания и вызывает погрешности размеров обрабатываемых деталей. Отжатие передней бабки при патронной работе зависит от величины вылета детали, и с увеличением расстояния от патрона до места обработки оно возрастает. Отжатие передней бабки при патронной работе приводит к погрешности формы — конусности, с уменьшением диаметра обрабатываемой детали к патрону. Нужно заметить, что жесткость при патронной работе часто очень низка, что объясняется, как правило, малой жесткостью самих патронов и их крепления к шпинделю станка.

Необходимо еще раз упомянуть, что погрешности, обусловленные упругими деформациями узлов станка, могут быть частично скорректированы. Это относится в первую очередь к деформациям, постоянным по длине обработки (погрешностям размера), которые сказываются с самого начала обработки. При работе по методу пробных стружек эта погрешность после пробного замера и дальнейшей корректировки установки резца может быть почти полностью компенсирована.

При обработке партии деталей и установке резца по эталонному валу или шаблону, если известна ожидаемая начальная величина упругих отжатий, можно скорректировать установку резца таким образом, чтобы значительно уменьшить погрешность. Если величина

упругих деформаций неизвестна, то погрешность обнаружится только после обработки первой детали.

Погрешности формы труднее компенсировать, но в некоторых случаях это удастся частично выполнить благодаря специальным приемам работы, о чем будет сказано ниже. Во всех случаях это, разумеется, можно выполнить только тогда, когда известна величина ожидаемых упругих деформаций. *Наиболее рациональным способом борьбы с погрешностями, обусловленными упругими деформациями узлов станка, является повышение жесткости станков.* С повышением жесткости станков повышается точность изготовления деталей, увеличивается виброустойчивость, а значит увеличивается и производительность.

Жесткость узлов станка зависит не только от собственной жесткости деталей, но в значительной мере от качества соединений этих деталей (стыков).

Наличие среди эксплуатируемых станков таких, которые обладают сравнительно высокой жесткостью (см. табл. 2), указывает на возможность общего повышения жесткости токарных станков.

Жесткость токарных станков может быть значительно повышена за счет правильной их эксплуатации и ремонта.

Для этого необходимо:

1) не забывать, что жесткость станков в большой степени зависит от качества сопрягаемых поверхностей, а поэтому при ремонтах станков нужно тщательно обрабатывать поверхности деталей в подвижных и неподвижных соединениях; в процессе эксплуатации станков следует внимательно следить за состоянием и чистотой поверхностей деталей станка;

2) во всех подвижных и неподвижных соединениях станка следить за предварительным натягом соединений;

3) во время работы станка применять затяжку тех направляющих, которые в процессе выполнения этой операции не перемещаются;

4) следить за состоянием и своевременным ремонтом патронов токарных станков;

5) при обработке в центрах устанавливать возможно меньший вылет пиноли задней бабки;

6) применять более жесткие вращающиеся центры с меньшим вылетом и лучше встроенные в заднюю бабку;

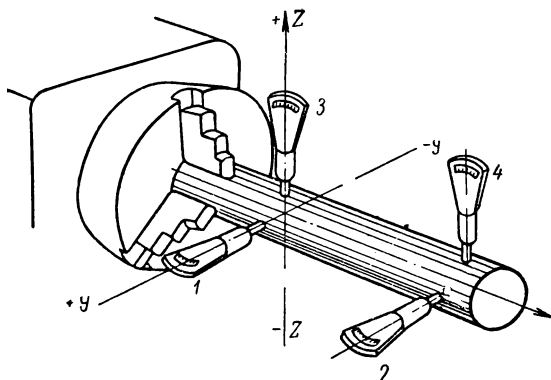
7) следить за состоянием поверхности центровых гнезд обрабатываемой детали.

Температурные деформации станка. Узлы токарного станка практически не нагреваются от теплоты, образующейся в процессе резания. Нагревается лишь передняя бабка от выделения теплоты: в подшипниках, муфтах и зубчатых зацеплениях. С момента пуска станка температура стенок коробки передней бабки и температура масла в передней бабке начинают повышаться от выделяющегося при трении тепла. Стенки коробки передней бабки, подшипники, шпиндель и прочие детали постепенно изменяют свои размеры. Нагревание отдельных частей бабки вследствие ряда причин происходит неравномерно, неравномерно происходит и их деформация.

В итоге ось шпинделя в ряде случаев отходит от своего первоначального положения, что приводит к изменению диаметра обрабатываемой детали и к погрешности ее формы.

Величина и направление смещения оси шпинделя токарного станка зависит не только от режима работы станка, но и от конструкции передней бабки, а также от способов ее крепления к станине станка.

Температурные деформации токарных станков, как показали опыты, могут достигать значительной величины, что необходимо



Фиг. 7. Схема измерения деформаций на токарном станке.

иметь в виду при обработке точных деталей. Систематических исследований температурных деформаций большого количества токарных станков не проводилось, поэтому в данной работе можно остановиться только на отдельных примерах.

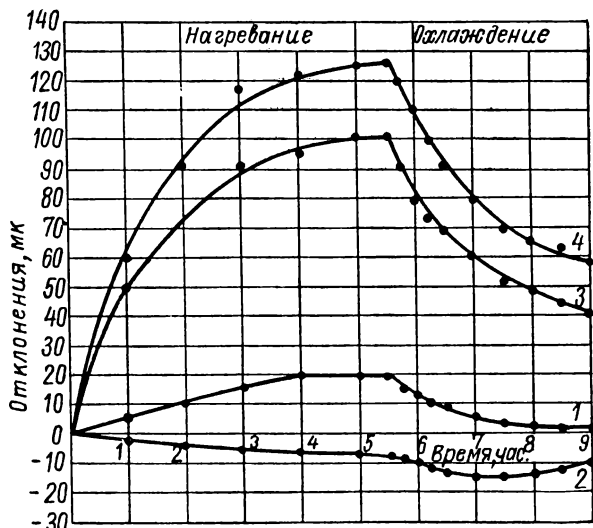
С точки зрения точности механической обработки на токарных станках представляют интерес только перемещения оси шпинделя станка в горизонтальной плоскости, но для сравнения в дальнейшем будут приведены некоторые данные и по температурным деформациям в вертикальной плоскости. На фиг. 7 представлена схема измерения температурных перемещений шпинделя токарного станка. Как видно из схемы, приборы 1 и 2 измеряют температурные деформации в горизонтальной плоскости, а приборы 3 и 4—в вертикальной.

В дальнейшем кривые температурных деформаций, относящиеся к этим приборам, обозначены этими же номерами.

На фиг. 8 представлена зависимость температурных перемещений в горизонтальной и вертикальной плоскостях от времени работы и охлаждения для станка 1А62.

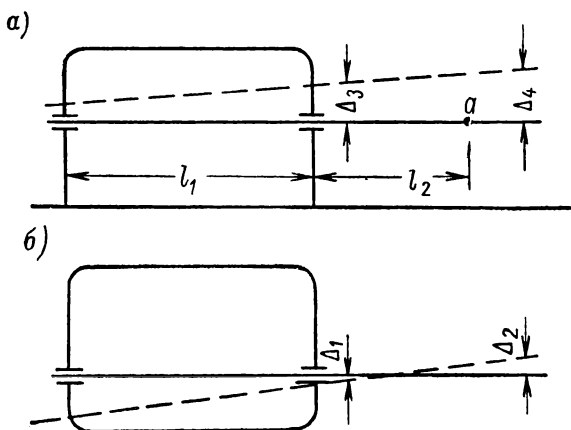
По горизонтальной оси отложено время в часах, а по вертикальной — величина смещения оси шпинделя станка. Как видно из графика, нагревание станка происходит в течение 4—6 час. его работы, а затем устанавливается температурное равновесие. Передняя бабка больше не нагревается. Смещение шпинделя приостанавливается.

С начала остановки станка (на графике после 5,5 часа работы) начинается медленное охлаждение передней бабки станка, и ось шпинделя после полного остывания занимает первоначальное положение.



Фиг. 8. Температурные перемещения шпинделя станка 1А62.

Как видим, температурные перемещения в горизонтальной плоскости достигают значительной величины 0,02 мм, причем перемеще-



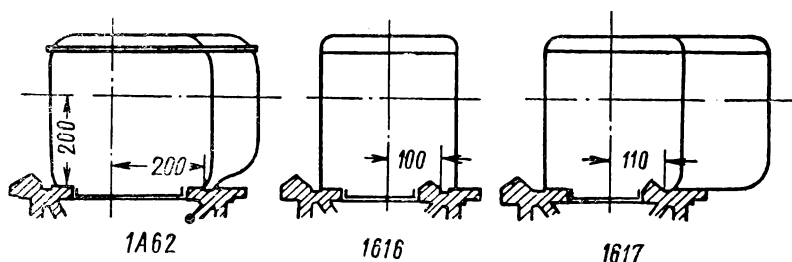
Фиг. 9. Схема изменения положения шпинделя станка 1А62 при работе: а — горизонтальная плоскость, б — вертикальная плоскость.

ния в точках измерения направлены в разные стороны, т. е. в результате температурных деформаций шпиндель в горизонтальной плоскости перекашивается (фиг. 9). В вертикальной плоскости деформа-

ции направлены в одну сторону, но имеют значительно большую величину. На фиг. 9Δ — смещение отдельных точек оси шпинделя.

Температура передней бабки и смещение ее оси зависит (при постоянном усилии резания) от числа оборотов станка. С повышением числа оборотов шпинделя температурные деформации в горизонтальной плоскости возрастают и непараллельность оси шпинделя к направляющим станка увеличивается. Для станка 1А62 эта непараллельность составляла в зависимости от числа оборотов шпинделя 0,006—0,025 мм на 300 мм длины.

Из сопоставления опытных данных можно сделать вывод, что в станках 1А62, 1616, 1617 перемещения оси шпинделя, вызванные



Фиг. 10. Крепление передней бабки к станине станка.

температурными деформациями, приблизительно пропорциональны скорости вращения шпинделя. Как указывалось выше, конструктивные особенности станков оказывают значительное влияние на температурные деформации. Так например, температурные перемещения шпинделя станка 1616 при одних и тех же скоростях вращения в четыре с лишним раза ниже, чем у станка 1А62. Это очевидно объясняется тем, что коробка скоростей станка 1А62 расположена в передней бабке, а коробка скоростей станка 1616 отделена от передней бабки и размещена внизу в тумбе.

Температурные деформации станка 1617 близки к температурным деформациям станка 1А62.

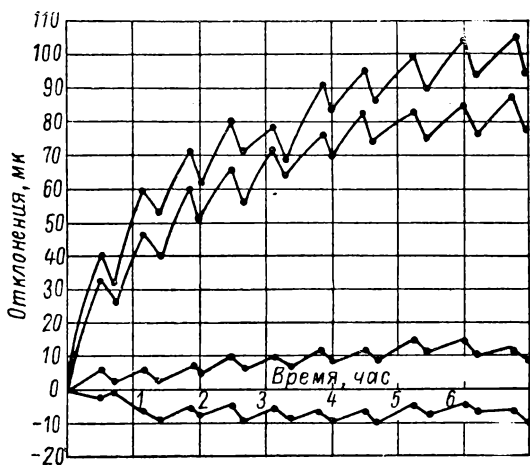
Величина смещения шпинделя станка и направление смещения зависят от способа крепления передней бабки к станине. Например, если корпус передней бабки крепится на задней призматической направляющей и передней плоской (фиг. 10), как это осуществлено в рассмотренных станках, то очевидно, что при таком креплении бабке легче сместиться в направлении «на рабочего».

На одном из станков иностранной марки с ВЦ = 385 мм и аналогичным креплением передней бабки к станине горизонтальное смещение оси шпинделя достигало величины 0,03 мм и было направлено в сторону рабочего, а на другом станке с ВЦ = 470 мм наблюдалось горизонтальное смещение шпинделя до 0,04 мм также в сторону рабочего.

Необходимо отметить, что в большинстве случаев температурные перемещения шпинделей в вертикальном направлении значительно больше, чем в горизонтальном (для рассматриваемых станков в 4—5 раз).

Это положение имеет большое значение при работе на револьверных станках, так как на револьверных станках часто резцы устанавливаются вертикально.

На одном из револьверных станков с ВЦ = 360 мм горизонтальное смещение оси шпинделя было 0,008 мм, а вертикальное—0,9 мм, что дает изменение диаметра обрабатываемой детали на 0,18 мм. Все данные, приводимые выше, относились к условиям непрерывной работы станков, однако в производстве работа на станке обычно чередуется с перерывами, а значит и температурные деформации



Фиг. 11. Температурные перемещения шпинделя токарного станка 1А62 при кратковременном повторяющемся режиме работы $n = 1200$ об/мин., $T_{\text{раб}} = 30$ мин., $T_{\text{пер}} = 10$ мин.

будут непрерывно изменяться. Наблюдение за поведением станков удобнее производить при регулярном чередовании работы и перерывов во времени, т. е. при кратковременном повторяющемся режиме. Среднее значение температурных перемещений шпинделя станка при кратковременном повторяющемся режиме не достигает максимальных перемещений, наблюдаемых при непрерывной работе станка, причем среднее значение перемещений зависит от соотношения времени работы станка и времени перерывов. Чем больше машинное время работы станка и меньше время перерывов, тем больше среднее перемещение.

Колебание перемещений (размах) зависит в одинаковой степени как от времени работы станка, так и от времени перерывов.

На фиг. 11 приведены кривые изменения перемещений оси шпинделя станка 1А62 при кратковременном повторяющемся режиме работы. Общая закономерность возрастания среднего температурного перемещения оси шпинделя в этом случае та же, что и при стационарном режиме (фиг. 8), но величина наибольшего перемещения меньше величины максимального перемещения при стационарном режиме.

нарном режиме. Кроме того, кривая перемещений носит пилообразный характер.

В табл. 3 приведены значения температурных перемещений оси шпинделя токарных станков при кратковременном повторяющемся режиме работы.

Таблица 3

Температурные перемещения оси шпинделя токарных станков при кратковременном повторяющемся режиме работы:

$T_{\text{раб}} = 5 \text{ мин.}, T_{\text{пер}} = 10 \text{ мин.}$

Станок и режим работы	№ точек измерения	Среднее значение перемещений в мк	Размах перемещений в мк
1А62 $n = 1200 \text{ об/мин.}$	1	8	3
	2	6	—
	3	35	5
	4	45	7
1617 $n = 720 \text{ об/мин.}$	2	8	1
	2	5	1
	3	30	3
	4	37	5
1616 $n = 1380 \text{ об/мин.}$	1	4	0.5
	2	4	0.5
	3	1	2
	4	3	5

Здесь рассматривались только температурные деформации передней бабки токарных станков, однако необходимо отметить, что во время работы станка испытывают температурные деформации и другие узлы и детали станка, но эти деформации, как правило, гораздо меньше влияют на точность механической обработки, чем рассмотренные выше.

Все сказанное убеждает в том, что температурные деформации токарных станков иногда могут достигать значительной величины, имеющей существенное значение в общей погрешности изготовляемой на станке детали. Величина и направление этой погрешности в большой степени зависят от конструкции передней бабки станка и ее крепления к станине. Температурная погрешность станка нарастает медленно и достигает своей максимальной величины через несколько часов работы станка. Надо иметь в виду, что в ряде случаев при работе на холодном станке ось шпинделя станка с течением времени может переместиться.

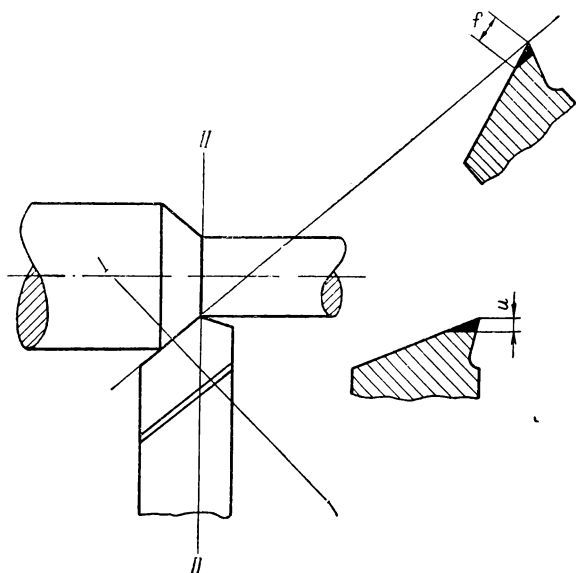
На основании материала, рассмотренного в этом разделе, можно сделать вывод, что погрешности изготовления деталей, связанные со станком и с изменениями, происходящими в положении его узлов во время работы, имеют большое значение.

Кроме рассмотренных погрешностей, на точность обработки оказывают влияние и другие, менее существенные, которые в данной брошюре не рассматриваются.

3. Погрешности, связанные с работой режущего инструмента (токарного резца)

Размерный износ инструмента. В процессе резания (обработка детали) каждый инструмент изнашивается. Износ инструмента вызывается трением обрабатываемой детали о заднюю грань инструмента и трением стружки о переднюю грань.

Обычно при изучении стойкости инструмента интересуются износом инструмента по задней грани (фаска износа — f), нормаль-



Фиг. 12. Износ резца при резании.

ным к главной режущей кромке в сечении $I—I$ (фиг. 12), и износом по передней грани. С точки зрения точности механической обработки представляет интерес износ инструмента, непосредственно отражающийся на точности обработки, размерный износ u , т. е. износ, измеряемый в сечении, нормальном к обработанной поверхности, проходящем через вершину резца (сечение $II—II$, фиг. 12). Этот размерный износ обычно и рассматривается при изучении точности обработки.

В технологии машиностроения размерный износ инструмента принято выражать в зависимости не от времени его работы, а от пройденного инструментом пути в металле — пути резания.

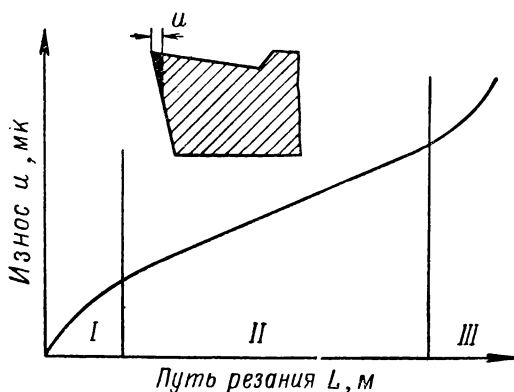
Зная подачу и путь резания, легко перейти к значению площади обработанной поверхности:

$$F = \frac{L \cdot s}{10} \text{ дм}^2 \text{ и } L = \frac{10 \cdot F}{s} \text{ м,}$$

где F — площадь обработанной поверхности в дм^2 ;

L — путь резания в м ;

s — подача в мм/об.



Фиг. 13. Зависимость размерного износа реза от пути резания:

- I — начальный износ;
- II — нормальный износ;
- III — ускоренный износ.

Зная диаметр обрабатываемой детали, длину детали и подачу, легко найти путь резания:

$$L = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{1000 \cdot s} \text{ м,}$$

где d — диаметр обрабатываемой детали в мм ;

l — длина обрабатываемой детали в мм .

Например, если обрабатывается валик диаметром $d = 60 \text{ мм}$ и длиной $l = 500 \text{ мм}$ с подачей $s = 0,3 \text{ мм/об.}$, то путь резания составит:






$$L = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{1000 \cdot s} = \frac{3,14 \cdot 60 \cdot 500}{1000 \cdot 0,3} = 314 \text{ м,}$$

а площадь обрабатываемой поверхности

$$F = \frac{L \cdot s}{10} = \frac{314 \cdot 0,3}{10} = 9,42 \text{ дм}^2.$$

Размерный износ инструмента протекает неравномерно. На фиг. 13 представлена типичная кривая зависимости размерного износа от

Динамика размерного износа

№ п/п	Путь резания в м	Износ в мк	Эскиз износа
1	0	0	
2	200	6	
3	500	10	
4	1000	13	
5	1500	14	

пути резания, а в табл. 4 дана динамика протекания размерного износа реза. Кривая износа может быть разделена на три достаточно резко разграниченных участка. Первый участок, называемый обычно первоначальным износом, отражает период приработки инструмента — он характеризуется интенсивным размерным износом. В этой зоне на протяжении сравнительно малого пути резания износ достигает значительной величины.

Протяженность первого участка зависит от состояния режущего лезвия после заточки, и при нормально доведенном лезвии длина этого участка не превышает 1000 м пути резания. После прохождения резцом пути резания в 1000 м состояние режущей кромки несколько стабилизируется. Второй участок (наиболее протяженный) — участок нормального износа — характеризуется прямой зависимостью износа от пути резания. На этом участке износ протекает равномерно, а его величина зависит от факторов процесса резания (режима резания, обрабатываемого материала, материала инструмента) и почти не зависит от первоначального

состояния лезвия инструмента. Длина этого участка зависит от условий обработки, обрабатываемого материала, материала резца и колеблется от 8000 до 20 000 м пути резания и больше.

Третий участок — участок интенсивного износа — непродолжителен. В зоне этого участка при чистовой обработке не рекомендуется работать, так как в этой зоне происходит разрушение лезвия резца.

Для удобства изучения износа инструмента в зависимости от факторов процесса резания и для упрощения расчетов введено понятие относительного размерного износа.

Относительным износом режущего инструмента называется средний размерный износ (выраженный в микронах) на 1000 м пути резания (на участке нормального износа).

Относительный износ легко определить, зная размерный износ на определенном пути резания:

$$u_0 = \frac{u \cdot 1000}{L} \text{ мк},$$

где u_0 — относительный износ в мк (микронах);

u — общий износ на пройденном пути резания (в зоне нормального износа в мк);

L — путь резания в м.

И наоборот, зная относительный износ (на основании экспериментов или справочных данных), легко определить общий размерный износ на всем пути резания.

Для размерного износа твердосплавного инструмента весьма большое значение имеет начальный период, во время которого резец изнашивается гораздо интенсивнее, чем при дальнейшей его работе.

Начальный износ оказывает большое влияние на общую величину размерного износа, и поэтому следует принимать все меры для его уменьшения.

Кроме того, наличие начального износа создает неопределенность в подсчете относительного износа. Поэтому принято рассчитывать, как указывалось уже выше, относительный износ по второму участку кривой размерного износа (участок нормального износа).

Общий износ резца рассчитывают по известному относительному износу и пройденному пути резания и затем прибавляют величину ожидаемого начального износа.

На основании экспериментальных данных можно считать, что начальный износ для резцов Т15К6 в зависимости от их заточки и доводки колеблется от 5 до 15 мк, а для резцов с пластинками твердого сплава Т30К4 — от 3 до 8 мк.

При расчете общего износа резца начальный износ можно учесть, полагая относительный износ на участке, равном 500—1000 м пути резания, увеличенным в 1,5—2 раза, или прибавляя к действительному пути резания добавочный $L_n = 1000—1500$ м, т. е. по формулам

$$u = (0,25 \div 1) u_0 + \frac{u_0 L}{1000} \text{ мк}$$

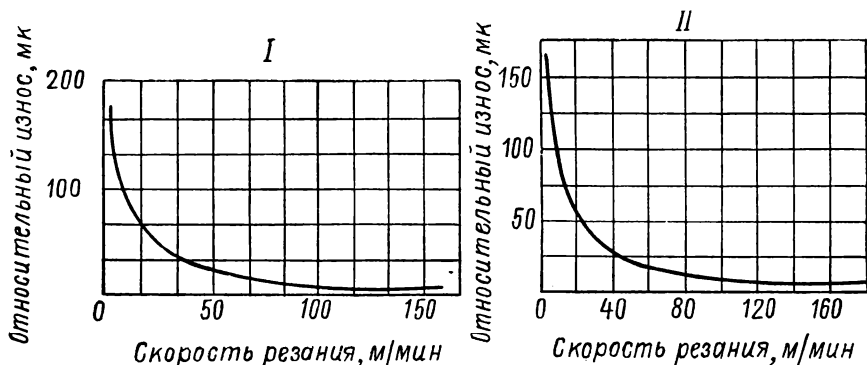
или

$$u = \frac{L + L_n}{1000} u_0 \text{ мк.}$$

Таким образом, зная общий износ резца на некотором пути резания, легко найти относительный износ, и наоборот.

Например: зная из таблиц, что относительный износ при принятых условиях обработки $u_0 = 6$ мк, и определив путь резания (по ранее приводившейся формуле), равный $L = 8000$ м, можно определить размерный износ на все пути резания в 8000 м;

$$u = \frac{L + L_n}{1000} u_0 = \frac{8000 + 1000}{1000} 6 = 54 \text{ мк.}$$



Фиг. 14. Зависимость относительного износа от скорости резания при $t = 0,3$ мм.
 $s = 0,18$ мм/об.

I — обрабатываемый материал сталь 40X;
II — обрабатываемый материал Ст. 5.

В этом примере добавочный путь резания принят $L_n = 1000$ м. Относительный износ зависит от режима резания и, в первую очередь, от скорости резания. На фиг. 14 показана типичная зависимость относительного износа от скорости резания при чистовой обработке стали резцами с пластинками твердого сплава.

По рассмотрении этой зависимости можно сделать общий вывод, что относительный износ в значительной степени зависит от скорости резания, причем при малых скоростях резания он велик, затем с повышением скорости резания падает, достигая минимальной величины при какой-то наивыгоднейшей скорости резания, и затем опять несколько возрастает. На малых скоростях резания он может достигать весьма высоких величин. Скорости резания минимального износа для обычных конструкционных сталей при режимах резания чистовой обработки лежат в пределах $v = 150-250$ м/мин, т. е. в пределах скоростей резания, применяемых при скоростном чистовом точении, тонком точении и скоростном чистовом точении широкими резцами.

Влияние подачи на относительный износ невелико: в пределах подач, применяемых при чистовом точении, относительный износ

изменяется на 30%. С увеличением подачи относительный износ возрастает.

Влияние глубины резания на относительный износ еще меньше. В пределах значений глубин резания, применяемых при чистовой обработке, относительный износ изменяется на 20% и с увеличением глубины резания возрастает.

Из элементов геометрии резца наиболее сильное влияние на относительный износ оказывает задний угол. При работе на высоких скоростях резания увеличение заднего угла с 8 до 15° приводит к повышению относительного износа на 30%. Остальные элементы геометрии резца влияют на относительный износ незначительно.

Влияние механических свойств обрабатываемого материала на относительный износ очень велико. Чем выше механические свойства материала, тем меньше скорость минимального износа (наивыгоднейшая скорость) и тем больше относительный износ.

Как и следовало ожидать, марка применяемого для резцов твердого сплава оказывает весьма значительное влияние на относительный износ.

При чистовой обработке стали лучшие результаты (меньший относительный износ) получаются при применении твердого сплава Т30К4 и Т60К6, больший относительный износ получается при применении Т15К6 и плохие результаты при обработке стали дает твердый сплав марки ВК8.

Относительный износ (износ на 1000 м пути резания) при наивыгоднейших скоростях резания чистового точения, при подаче, равной или меньшей 0,3 мм/об и глубине резания, равной или меньшей 2 мм, можно принять согласно табл. 5¹.

Таблица 5

Относительный износ при чистовом точении в мк

Обрабатываемый материал	Резец из сплава	
	Т15К6	Т30К4
Сталь легированная термообработанная $\sigma_s = 110 \text{ кг/мм}^2$	10	6
Сталь конструкционная $\sigma_s = 60 \text{ кг/мм}^2$	8	4

В табл. 6 приведены значения погрешности в диаметре вследствие размерного износа резца в зависимости от пути резания.

Как видим, погрешность, вызванная размерным износом инструмента, может достигать значительной величины и существенно влияет на общую погрешность изготовления. Износ резца при обработке крупных деталей приводит к их конусности, а при обработке партии мелких деталей на настроенном станке — к постепенному увели-

¹ Табл. 5 и 6 взяты из книги А. П. Соколовского «Расчеты точности обработки на металлорежущих станках», Машгиз, 1952.

Погрешность в диаметре, вызываемая размерным износом резца,
при чистовой обработке стали на режимах скоростного резания

Сталь σ_6 кг/мм ²	Твердый сплав	u_0 в мк	Путь резания в м							
			1000	2000	4000	6000	8000	10 000	15 000	20 000
			мк							
110	Т15К6	10	40	60	100	140	180	220	320	420
65		8	32	48	80	112	144	176	256	336
110	Т30К4	6	24	36	60	84	108	132	192	252
65		4	16	24	40	56	72	88	128	168

чению диаметра последовательно обрабатываемых заготовок, что вызывает необходимость подналадки станка, а затем и смены изношенного инструмента.

Мероприятия по уменьшению размерного износа резцов с пластинками твердых сплавов при чистовом точении:

1) выбор наиболее износостойкого твердого сплава для данных условий обработки; при обработке стали наибольшей износостойкостью обладают сплавы Т15К6 и Т30К4, а при спокойной работе и малых сечениях стружки лучше употреблять Т60К6;

2) выбор режима резания, характеризующегося наименьшим износом; подачу необходимо принимать возможно большей при условии соблюдения чистоты обработанной поверхности; скорость резания следует принимать равной скорости наименьшего относительного износа;

3) тщательная заточка и доводка чистовых резцов.

В настоящее время все большее применение при чистовой обработке находят минералокерамические пластинки. Необходимо отметить, что износ резцов с минералокерамическими пластинками значительно меньше износа резцов с пластинками твердых сплавов.

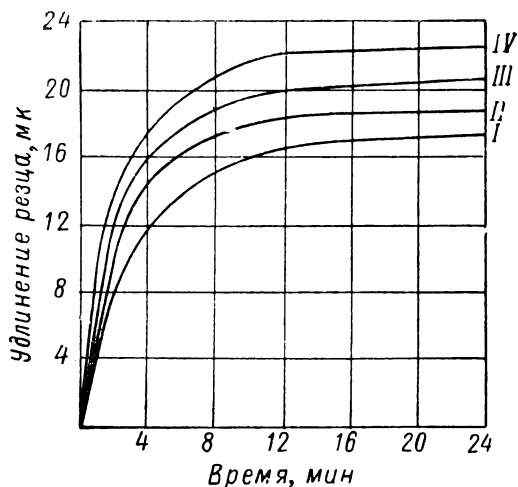
Температурные деформации резца. К погрешности изготовления относятся также погрешности, обусловленные температурными деформациями инструмента (резца).

В процессе резания в зоне стружкообразования выделяется большое количество теплоты. Основная часть тепла уносится снятой стружкой, но сравнительно большая его часть воспринимается инструментом и деталью.

После вступления в работу под действием теплоты резания лезвие резца быстро нагревается до высоких температур, а спустя некоторое время нагревается и вся головка резца. Вследствие этого головка резца удлиняется, что приводит к уменьшению диаметра обрабатываемого изделия. Погрешности от температурного удлинения резца значительны, и в ряде случаев при точной обработке их необходимо учитывать. Нагревание резца в процессе обработки

протекает неравномерно. Вначале резец быстро нагревается, а затем увеличение его температуры происходит медленно. При достижении определенной температуры головки резца, зависящей от режима резания, размеров резца и т. п., дальнейшее нагревание резца прекращается, наступает тепловое равновесие.

Любой перерыв в работе приводит к охлаждению резца и тем самым к уменьшению его размера (укорочению). После последующего вступления резца в работу, при тех же условиях, опять происходит его удлинение до размера, установившегося при тепловом равновесии.



Фиг. 15. Зависимость удлинения резца от времени его работы при разных скоростях резания (Ст. 3)

I — $v = 41$ м/мин;
 II — $v = 76$ м/мин;
 III — $v = 133$ м/мин;
 IV — $v = 160$ м/мин.

Время и величина удлинения зависят от ряда факторов процесса резания: режима резания, сечения и вылета резца, обрабатываемого материала, материала резца, охлаждения и пр.

На фиг. 15 приведена зависимость удлинения резца от времени его работы при чистой обработке детали из Ст. 3 для разных скоростей резания. Как видим из графика, скорость резания заметно влияет на величину удлинения резца, но почти не влияет на время его нагревания до теплового равновесия, которое при всех скоростях приблизительно одинаково и составляет 12—16 мин.

В зависимости от скорости резания удлинение резца изменяется от 17 мк при $v = 44$ м/мин до 22 мк при $v = 160$ м/мин. Глубина резания также оказывает влияние на величину удлинения резца. Так, в одном из опытов при глубине резания $t = 0,25$ мм удлинение резца оказалось 12 мк, а при $t = 0,5$ мм оно составило 20 мк. При увеличении подачи от $s = 0,1$ мм/об до $s = 0,3$ мм/об удлинение резца возросло от 28 до 56 мк.

Вылет резца также влияет на величину температурной деформации, например, при изменении вылета от 20 до 40 мм температурная деформация возросла от 18 до 28 мк.

При изменении сечения резца с 25×40 до 20×30 м удлинение резца увеличилось с 28 до 50 мк.

Температурное удлинение резца в значительной степени зависит от обрабатываемого материала. Так например, удлинение резца составило (в мк) при обработке:

Ст. 3 ($\sigma_g = 30 \text{ кг/мм}^2$)	14
стали 35ХН ($\sigma_g = 70 \text{ кг/мм}^2$)	30
стали 35ХН термообработанной ($\sigma_g = 110 \text{ кг/мм}^2$)	48

Все приведенные цифры относятся к скоростной обработке стали с режимом чистового точения без охлаждения. Из приведенных цифр видно, что температурные деформации резцов достигают значительной величины, могущей заметно сказаться на величине общей погрешности изготовления. Величина температурных деформаций зависит от обрабатываемого материала, режима резания, сечения и вылета резца.

Как показали опыты, геометрия резца и толщина пластинки твердого сплава также влияют на температурную деформацию резца, но в значительно меньшей степени, чем факторы, рассмотренные выше.

Установлено также, что температура головки резца, а значит и температурная деформация резца зависят и от вида сходящей стружки. Путаная стружка, окружающая головку резца или находящаяся вблизи нее, дополнительно нагревает резец.

В табл. 7 приводятся некоторые данные по температурным деформациям резцов при чистовом точении¹.

Таблица 7

Погрешность в диаметре (в мк), обусловленная температурными деформациями резца при точении стали в условиях установившегося температурного равновесия. Вылет резца 40 мм, сечение резца 20×30 мм. Обрабатываемый материал — сталь, $\sigma_g = 75 \text{ кг/мм}^2$

t·s	v, м/мин			
	100	150	200	250
0,05	48	58	67	75
0,075	64	79	91	102
0,10	80	98	114	127
0,15	109	133	154	172
0,2	135	165	191	213
0,3	182	224	259	289

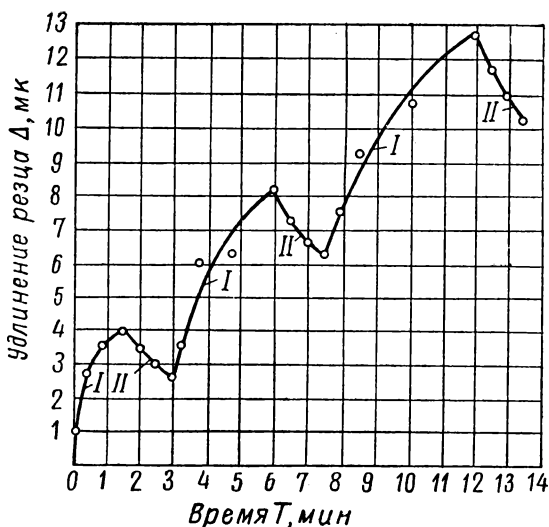
При прерывистом резании представляет интерес не только температурное удлинение резца, но и его укорочение (при охлаждении во время перерывов в работе).

На фиг. 16 показана кривая изменения размеров резца при обработке партии колец. Как видно из графика, за время установки нового кольца на оправке резец успевает охладиться и размер его уменьшается.

¹ Табл. 7 взята из книги А. П. Соколовского «Расчеты точности обработки на металлорежущих станках», Машгиз, 1952.

Время охлаждения резца зависит от температуры его нагрева, величины сечения и вылета, температуры окружающей среды и от условий охлаждения (вентиляции и пр.).

На основании сказанного можно сделать вывод, что погрешности от температурных деформаций резца влияют на погрешности формы и размеры деталей, обрабатываемых на токарных станках. Эти погрешности в ряде случаев могут достигать значительных величин, существенных для точности при изготовлении деталей. Особенностью температурной погрешности инструмента является то, что удлине-



Фиг. 16. Ступенчатая кривая изменения длины резца при обтачивании колец:

I — периоды нагревания резца (работа резца);
II — периоды охлаждения резца (смена кольца на оправке).

ние резца происходит в течение сравнительно небольшого промежутка времени после начала резания, а затем размер резца остается постоянным при условии непрерывного резания. В случае прерывистого резания, например, при обработке отдельных деталей с перерывами на установку, резец во время перерывов охлаждается и укорачивается. При длительных перерывах это укорочение резца может быть существенным.

Температурная деформация резца является систематической погрешностью изготовления, подчиняющейся определенным закономерностям. Зная условия проведения обработки (обрабатываемый материал, размеры резца и режим резания), температурное удлинение резца можно рассчитать.

В целях уменьшения температурной погрешности резца следует:

- 1) работать резцами возможно большего сечения;
- 2) по возможности уменьшать вылет резца от места закрепления;

3) если возможно, применять обильное охлаждение резца во время его работы;

4) не работать затупленными резцами, так как тупой резец в процессе резания выделяет большее количество тепла;

5) выбирать рациональный режим резания с точки зрения температурных деформаций резца;

6) следить за сходящей стружкой, не давая ей возможности опутывать резец.

Жесткость инструмента. При обычном обтачивании детали на токарном станке жесткость инструмента — резца (в направлении действия составляющей усилия резания P_y) велика, так как головка резца работает на сжатие; при этом деформации инструмента в горизонтальном направлении так малы, что при расчетах ими обычно пренебрегают. В этом случае расчет упругой технологической системы сводится к расчету системы станок — деталь.

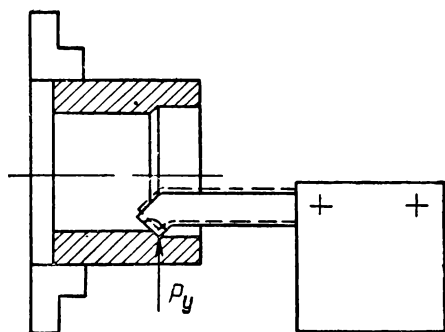
Совсем иначе обстоит дело при растачивании на токарном станке глубоких отверстий, когда тело державки удлиненное или резец крепится в оправке с большим вылетом.

При большом вылете державки резец под действием усилия резания P_y будет прогибаться в горизонтальной плоскости, и вершина резца переместится к центру обрабатываемой детали (фиг. 17). Такая деформация инструмента повлечет за собой уменьшение диаметра растачиваемого отверстия. В этих случаях приходится считаться с деформациями инструмента, которые могут оказать значительное влияние на точность обрабатываемой детали.

Жесткость, а значит и возможные деформации державок и оправок, несложно рассчитать теоретически и проверить экспериментально.

Необходимо помнить, что прогиб державки расточного резца изменяется пропорционально величине вылета в третьей степени, а поэтому чем больше вылет, тем массивнее (большого сечения) должна быть державка. Для уменьшения веса державки с большим вылетом тело ее следует делать переменного сечения, уменьшая размеры сечения по направлению к вершине резца.

Необходимо иметь в виду, что жесткость зависит не только от жесткости самой державки, но и от жесткости соединения державки с суппортом станка. Нужно следить за надежным креплением державки в резцедержателе, причем, чем больше вылет державки, тем надежнее должно быть ее крепление. В практике часто встре-

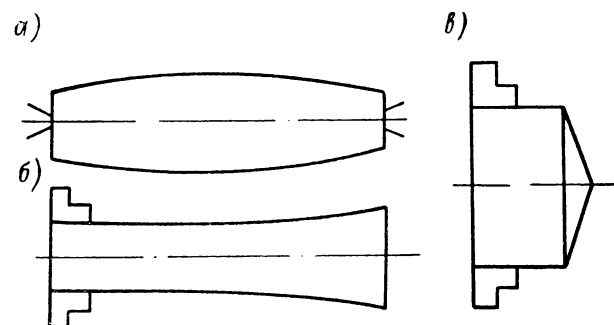


Фиг. 17. Деформация расточного резца при обработке отверстий на токарном станке.

Чаются случаи, когда при достаточной жесткости державки жесткость крепления ее мала, и это приводит к появлению вибраций и потере точности.

4. Погрешности, связанные с обрабатываемой деталью

Жесткость обрабатываемой детали. Во время обработки детали на токарном станке усилия резания действуют на обрабатываемую деталь (например, вал, обтачиваемый в центрах станка). Под действием этих усилий вал прогибается, и центр его поперечного сечения удаляется от вершины резца. Прогиб вала по длине обработки не одинаков, так как при перемещении резца изменяется расстояние от точки приложения усилий резания до опор вала (центров станка). Таким образом, прогиб вала приводит к погрешности его формы. При



Фиг. 18. Погрешности формы обтачиваемых деталей, обусловленные их деформацией.

обтачивании валов малой жесткости в центрах станка получается бочкообразная форма вала (фиг. 18, а).

При обточке вала малой жесткости в патроне токарного станка также наблюдается неодинаковый по длине прогиб вала. У торца патрона, вследствие малого расстояния от точки приложения усилия резания до места закрепления вала, прогиб меньше, а по мере увеличения расстояния (вылета) прогиб увеличивается. При обработке в патроне получается погрешность формы вала, которая обычно (условно) называется конусностью (фиг. 18, б).

При подрезке торца нежесткой детали, закрепленной в патроне, получается погрешность формы торца (фиг. 18, в).

Жесткость детали, обрабатываемой на токарном станке, во многих случаях, с большей или меньшей точностью, может быть определена расчетным путем. При обработке повторяющихся деталей жесткость может быть определена достаточно просто экспериментально. Для экспериментального определения жесткости детали необходимо ее нагрузить усилием, воспроизводящим усилие резания, и определить соответствующую деформацию детали.

В случае обработки деталей малой жесткости (например, при обработке в центрах длинных и тонких валов) с успехом могут быть

применены приспособления, увеличивающие жесткость детали, как например, подвижные и неподвижные люнеты. Благодаря дополнительной опоре в люнете жесткость обрабатываемой детали значительно повышается.

При решении вопроса о необходимости применения люнета следует учитывать, что жесткость гладкого вала, закрепленного в центрах станка, определяется по формуле

$$j = 48000d \left(\frac{d}{l} \right)^3 \text{ кг/мм},$$

где d — диаметр обрабатываемого вала в мм;

l — длина обрабатываемого вала в мм, и зависит не только от отношения $\frac{d}{l}$, как иногда считают, но еще и от d , т. е. при одинаковом отношении $\frac{d}{l}$ вал большего диаметра будет обладать большей жесткостью.

При обработке маложестких деталей в патроне рекомендуется «подпирать» обрабатываемую деталь задним центром.

Часто в практике наблюдается недостаточная жесткость сопряжения центров (особенно заднего) с центровым гнездом в обрабатываемой детали. Вследствие малой жесткости этого сопряжения получается дополнительное смещение (отжим) обрабатываемой детали, которое объясняется смятием поверхности центрального гнезда. При работе в центрах необходимо обеспечивать соответствие конусности центрального гнезда и конусов станка, высокую чистоту поверхности центрального гнезда и достаточные его размеры.

Температурные деформации обрабатываемой детали. Обрабатываемая деталь в процессе резания нагревается неравномерно по длине, что вызвано перемещением по мере обработки зоны поступления тепла и неравномерным его распределением по телу детали. Вследствие неравномерного нагревания детали погрешность, обусловленная температурными деформациями, приводит к погрешности формы детали.

Заметное нагревание детали обычно наблюдается при снятии крупных сечений стружек (черновой обработке), при чистовой же обработке деталей температурные деформации, как правило, не достигают большой величины. Однако в ряде случаев, особенно при обработке тонкостенных деталей, погрешность от температурных деформаций обрабатываемой детали может влиять на размеры и форму обрабатываемой детали, и особенно в том случае, когда чистовая обработка непосредственно следует за черновой.

На основании проведенных исследований по температурным деформациям обрабатываемых на токарных станках деталей можно установить следующие зависимости. При повышении скорости резания и подачи температура детали понижается, а при увеличении глубины резания она повышается.

Чем массивнее деталь, тем меньше ее температурные деформации.

При любых условиях, как при наружном обтачивании, так и при

внутреннем растачивании, температурные деформации детали приводят к уменьшению ее размеров в поперечном сечении.

Погрешности, обусловленные внутренними напряжениями и деформацией в процессе закрепления деталей. Внутренние напряжения в детали возникают при горячей обработке металлов (отливка, ковка, прокатка), при обработке давлением в холодном состоянии (например, при правке заготовок), а также при обработке металлов резанием.

При снятии слоя металла с детали, в которой имеются внутренние напряжения, наблюдается деформация этой детали. Значительные деформации деталей наблюдаются при снятии первых слоев металла с заготовки (корки), однако на всех ступенях обработки эти деформации имеют место, хотя и в значительно меньшей степени. Погрешности, обусловленные внутренними напряжениями в металле, могут привести к погрешности размера и формы обрабатываемой детали.

Необходимо отметить, что в настоящее время часто специально создаются напряжения определенного знака в поверхностном слое обработанных деталей для увеличения их эксплуатационных характеристик (упрочняющая технология).

Часто при закреплении обрабатываемых деталей в патроне станка или в приспособлении их деформируют усилиями зажима (тонкие кольца, втулки и т. п.).

Деформированные при закреплении детали после обработки получают неправильную форму и размеры. При обработке этих деталей необходимо предусматривать такие способы закрепления, которые бы гарантировали отсутствие деформаций.

5. Погрешности настройки на размер

При работе немерным инструментом (резцом) точность получаемого размера зависит от правильного положения режущей кромки относительно линии центров станка, т. е. от правильной установки реза на стружку. Правильная настройка на размер имеет большое влияние на точность обработки, так как погрешность настройки может быть значительной. Погрешность настройки не сказывается на форме обрабатываемой детали (не влияет на погрешность формы), а сказывается только на размере детали. На фиг. 1 средний размер первой детали (начало линии *B*) не совпадает с настроенным размером, что объясняется как раз погрешностью настройки. Различают два метода работы «по промерам» и «по настройке».

Метод работы по промерам состоит в том, что рабочий в начале каждого прохода устанавливает инструмент на стружку и обрабатывает вначале небольшой участок поверхности. Получаемый размер проверяется, глубина резания корректируется, после чего протачивается вся поверхность. При точных работах такое корректирование размеров с предварительной проточкой пояса иногда производится несколько раз. При установке и корректировании

размера пользуются показанием лимбов, специальными точными шкалами, индикаторами и т. п.

Величина погрешности установки на стружку зависит от точности делений шкалы приспособления для установки (например, лимба винта поперечного самохода), точности винта поперечного перемещения супорта, легкости хода супорта, квалификации рабочего, освещенности, точности измерений размера детали и т. д. Все эти погрешности изучаются специальными методами. Ниже приведен результат экспериментов по определению величины некоторых погрешностей настройки.

Величина погрешности установки резца на размер на токарном станке при пользовании лимбом с ценой деления 0,02 мм оказалась равной 56 мк. Эта погрешность складывается из нескольких случайных погрешностей. Некоторые из этих составляющих также изучались, причем были получены следующие результаты. Погрешности винта составили 16 мк, погрешности совмещения рисок лимба — 5 мк, погрешности обмеров — 4 мк.

Метод работы по промерам применяется в индивидуальном и отчасти мелкосерийном производствах.

В массовом и крупносерийном производствах применяется метод работы по настройке. В этом случае инструмент (резец) устанавливается относительно линии центров станка в начале обработки партии деталей, и положение его не меняется при обработке всей партии или до момента необходимой поднастройки или перенастройки станка, вызывающихся, как правило, износом инструмента.

Применяются два принципиально различных метода настройки станка на размер: настройка по пробным деталям и статическая настройка по эталонам, шаблонам и т. д. При работе «по настройке» погрешность настройки зависит от точности измерений, точности регулирования положения инструмента, т. е. в основном от тех же условий, что и при работе по промерам.

Кроме упомянутых погрешностей изготовления, встречается еще ряд других, из которых упомянем самопроизвольное смещение супорта. Оказывается, что после настройки станка по мере его работы наблюдается сползание резца по направлению к оси станка, что приводит к уменьшению диаметра последовательно обрабатываемых деталей. Это явление объясняется наличием упругого натяжения отдельных звеньев узла супорта, полученного во время настройки станка. Силы упругости заставляют супорт двигаться вперед во время толчков, наблюдающихся при работе станка и, главным образом, во время включения механизма подачи.

В заключение, возвращаясь к точечной диаграмме (фиг. 1), мы можем сделать следующие предположения. В начале обработки на первых деталях (кольцах) размер обрабатываемых деталей систематически уменьшался, что, очевидно, было вызвано температурной погрешностью (удлинением) резца, которая доминировала над величиной размерного износа резца. Начиная с 8—9-й детали, размер их начинает постепенно возрастать. Это возрастание размера деталей вызвано размерным износом резца, так как к этому времени

резец уже заметно не удлиняется вследствие достижения теплового равновесия.

Разница в начальных и конечных размерах каждой детали вызвана разной величиной упругих деформаций. При патронной работе с уменьшением расстояния от резца до опоры шпинделя, величина упругой деформации уменьшается.

Представляет большой интерес вопрос о том, можно ли заранее рассчитать изменение точности механической обработки по мере выполнения технологического процесса на настроенном станке. Вопрос, собственно, сводится к тому, можно ли заранее, до обработки деталей, построить диаграмму точности технологического процесса, подобную точечной диаграмме фиг. 1.

Оказывается можно. Такие расчеты в настоящее время производятся и дают хорошее совпадение с действительными результатами. В самом деле, зная законы изменения систематических погрешностей по времени (или чаще по пройденному пути резания), что рассматривалось выше, можно путем их сложения найти общую закономерность изменения точности деталей по мере их изготовления, т. е. форму и направление средней кривой на фиг. 1. С другой стороны, зная возможные пределы колебаний случайных погрешностей изготовления (колебание припуска на заготовках, колебание механических свойств обрабатываемого материала и т. п.), можно установить величину разброса размеров деталей около найденной средней линии (т. е. величину мгновенного поля рассеивания) и тем самым определить возможные колебания точности изготовления каждой детали в партии.

Если, кроме того, рассчитать возможную погрешность настройки станка, что также можно произвести на основании сложения отдельных погрешностей настройки (см. выше), то представляется возможным вписать диаграмму точности наиболее выгодно (с точки зрения производства) в поле допуска обрабатываемой детали и заранее установить моменты поднастройки и перенастройки станка.

6. Общие методы повышения точности обработки на токарных станках

В предыдущих параграфах указывались возможные способы снижения отдельных погрешностей обработки. Это мероприятие следует всегда иметь в виду при выполнении на станке точной работы. Однако, даже приняв все меры к снижению погрешностей обработки, полностью избежать их не представляется возможным. Как систематические, так и случайные погрешности обработки в той или иной степени всегда будут иметь место. В настоящее время при повышении требований к точности механической обработки и при механизации и автоматизации технологических процессов могут быть осуществлены и иные методы повышения точности обработки, в частности, на токарных станках.

Очевидно, самым рациональным методом был бы способ непрерывного корректирования размера обрабатываемой детали в про-

цессе ее обработки. Как известно, такой метод повышения точности и производительности механической обработки в ряде случаев применяется, главным образом, при шлифовании (измерения на ходу с корректированием размера).

Применение этого метода на токарных станках в настоящее время встречает ряд трудностей, главным образом, связанных с невозможностью измерения размера детали в момент получения этого размера, т. е. в момент снятия стружки.

Возможны и другие методы частичной компенсации погрешностей обработки. Так например, большое значение в общей погрешности изготовления имеют погрешности, вызванные колебанием усилий резания, которые, в свою очередь, вызываются колебанием припуска под обработку, механическими свойствами обрабатываемого материала, притуплением резца и т. п. Если встроить в станок элемент (датчик), который непрерывно измерял бы силы резания, то очевидно можно разработать специальную схему, при которой всякое отклонение при обработке от среднего значения силы резания и тем самым отклонение от средней величины упругих деформаций системы компенсировалось бы соответствующим изменением положения резца относительно обрабатываемой детали.

Подобную схему можно осуществить и для компенсации некоторых других погрешностей изготовления. Например, для компенсации погрешности, обусловленной температурной деформацией резца, можно разработать схему с измерением температуры головки резца.

Подобные схемы компенсации отдельных погрешностей обработки в виде экспериментальных установок осуществлены и дают значительное повышение точности обработки.

В ряде случаев, особенно при обработке нежестких валов в центрах, большие погрешности формы обрабатываемого изделия (бочкообразность) вызываются неравномерной жесткостью технологической системы по длине обрабатываемой детали. Иногда в этом случае для уменьшения погрешностей формы прибегают к соответствующему смещению задней бабки станка и тем самым частично компенсируют погрешности формы.

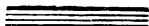
В ряде случаев прибегают к другому методу: уменьшают жесткость задней бабки (за счет выдвижения пиноли) и тем самым также частично компенсируют погрешность формы. Сущность этой компенсации можно ясно представить из сопоставления форм вала на фиг. 6 и 18. Однако, при применении этого метода необходимо иметь в виду, что при этом уменьшается общая жесткость технологической системы, что может привести к неустойчивой работе и вибрациям.

Наиболее общим методом повышения точности обработки является повышение точности изготовления заготовок, более жесткое соблюдение механических свойств заготовок, а также тщательный уход за оборудованием и качественное изготовление и заточка инструмента.

В заключение следует отметить, что проблема точности механической обработки сложна и требует для своей разработки боль-

шого количества теоретических и экспериментальных работ. В настоящем выпуске мы постарались в упрощенной форме изложить те результаты, которые имеются на сегодняшний день.

Основы учения о точности механической обработки созданы трудами советских ученых, которые продолжают работать в этом направлении. В ближайшие годы, очевидно, будет разрешено еще много других вопросов в этой области, что даст возможность более уверенно и с большей точностью производить обработку деталей на металлорежущих станках.



Г Л А В А II

ВИБРАЦИИ ПРИ ТОЧЕНИИ И МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НИМИ

Широкое внедрение современных высокопроизводительных методов обработки металлов резанием, повышение точности изготовления деталей машин, улучшение качества поверхности деталей — все эти вопросы неразрывно связаны с устойчивостью движения при резании.

Если процесс точения происходит спокойно, то резец и деталь совершают только те движения, которые предусмотрены самой схемой обработки. Шпиндель вместе с деталью равномерно вращаются, а супорт вместе с резцом совершают равномерное поступательное движение. Однако в некоторых случаях процесс спокойного резания нарушается. Изделие и резец, кроме предусмотренных движений, начинают совершать также периодические колебания — возникают так называемые вибрации.

Периодические перемещения вала относительно резца приводят к тому, что на обработанной поверхности остаются характерные волны, благодаря чему чистота поверхности сильно снижается, а поверхностные слои металла получают наклеп. Стойкость (работоспособность) инструмента при вибрациях также сильно снижается, а иногда возникновение вибраций приводит к поломке инструмента.

Станки, работающие на вибрационных режимах, значительно быстрее изнашиваются, стыковые зазоры увеличиваются, и оборудование скорее выходит из строя. Значительный шум, возникающий при вибрациях, сказывается на утомляемости рабочего.

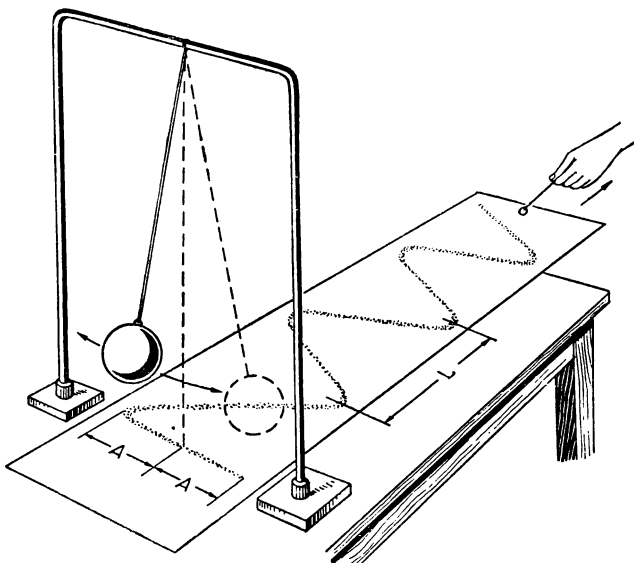
Возможность возникновения вибраций во многих случаях заставляет снижать режимы резания и ограничивать производительность металлорежущих станков. Возникновение вибраций заставляет работать при пониженных скоростях и меньших глубинах, ограничивает возможности применения широких резцов и т. п. Все вышесказанное убеждает нас в том, что вибрации при точении деталей и борьба с ними являются одним из весьма важных вопросов, связанных с механической обработкой металлов резанием.

Бороться с вибрациями металлорежущих станков часто труднее, чем с вибрациями других машин, так как колебания даже в несколько микрон, особенно при чистовых операциях, недопустимы.

Кроме того, вибрации при резании обычно возникают в широком диапазоне условий и режимов резания, колебания же в машинах обычно происходят в узком диапазоне, при каких-либо определенных условиях.

7. Понятие о колебаниях

В технике и жизни мы часто сталкиваемся с различными видами колебаний. Например, колебания в электрическом контуре радиоприемника, колебания струны скрипки, скрип несмазанной дверной петли и вибрации при резании — все это различные явления. Однако углубленное изучение законов колебаний показывает, что между этими колебательными процессами есть много общего. По-



Фиг. 19. Собственные колебания маятника.

этому, прежде чем говорить о вибрациях при резании, познакомимся с некоторыми основными понятиями о колебаниях вообще.

Виды колебаний можно разделить на три группы:

- 1) собственные или свободные колебания;
- 2) вынужденные колебания и
- 3) автоколебания.

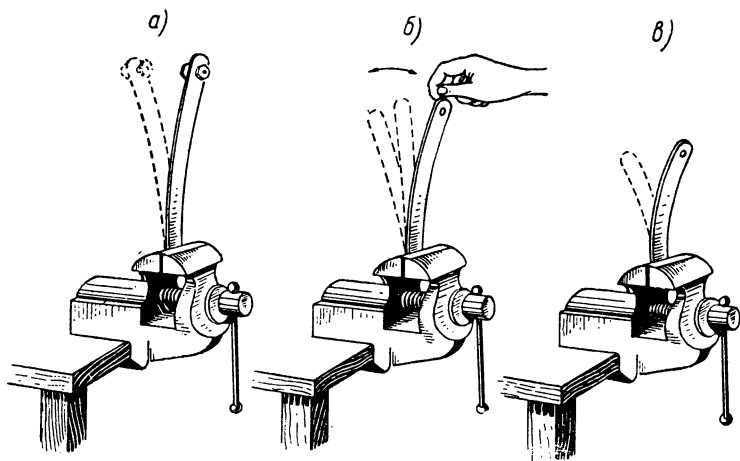
Для уяснения некоторых понятий проследим за колебанием груза (маятника), подвешенного на веревке (фиг. 19).

Если его только один раз вывести из равновесия, то груз начнет совершать периодические колебания относительно своего среднего положения. Вследствие наличия трения размахи груза будут постепенно уменьшаться.

Подобные же колебания будут совершать линейка, зажатая одним концом, струна гитары, если их вывести из равновесия и отпустить.

Такие колебания называются *собственными*.

Чтобы лучше проследить за поведением маятника, предположим, что во время колебаний из него тонкой струйкой высыпается песок. Отведем рукой маятник в сторону, а затем отпустим его. Маятник начнет раскачиваться из стороны в сторону, а высыпавшийся песок будет оставлять на столе след в виде линии. Величина отклонения маятника влево или вправо от вертикального положения, характеризующая интенсивность колебаний, называется *амплитудой*. На фиг. 19 размер A это амплитуда, а вся величина полного раз-



Фиг. 20. Собственные колебания ножовочного полотна.

маха маятника равняется двум амплитудам $A + A$. Промежуток времени, в течение которого маятник перемещается из одного крайнего положения в другое и обратно, называется *периодом колебаний*, а число таких полных колебаний в одну секунду называется *частотой*.

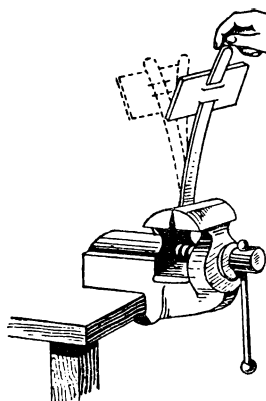
Если под маятник поместить лист слегка смоченной бумаги и заставить его равномерно скользить по столу, то песок, высыпаясь, начертит кривую колебаний маятника. На бумаге мы увидим линию, называемую *синусоидой*. Расстояние между вершинами синусоиды, обозначенное буквой L , называется *длиной волны*.

Некоторые свойства собственных колебаний можно хорошо уяснить из очень простого опыта.

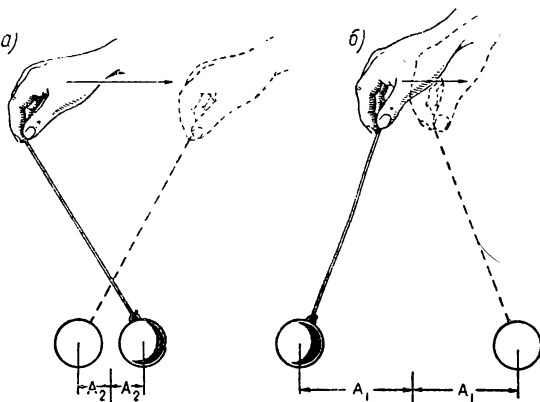
Если зажать в тиски один конец полотна ножовки, а другой конец отвести в сторону и отпустить, то ножовочное полотно начнет совершать собственные колебания с некоторой частотой (фиг. 20, б) *Колебания более высокой частоты* (более высокий звук) можно получить, если длина свободной части полотна будет меньше (фиг. 20, в). *Колебания более низкой частоты* будут получаться, если длина свободной части полотна будет больше. Еще более низкочастотные колебания будут получаться, если на конце полотна укрепить какой-либо груз, например, болт с гайкой (фиг. 20, а).

Из этих нескольких опытов легко заключить, что частота собственных колебаний зависит от жесткости (длины) и веса (массы) колеблющегося тела: *увеличение жесткости увеличивает частоту, увеличение массы уменьшает частоту.*

Величина же начального толчка влияет только на интенсивность начальных колебаний (амплитуду) и их продолжительность, но не на их частоту. Колебания, как бы ни был силен начальный толчок, вследствие потерь на внутреннее трение полотна ножовки и трения о воздух всегда прекращаются. Влияние трения на продолжительность и интенсивность колебаний легко уяснить, если



Фиг. 21. Колебания при большом затухании.



Фиг. 22. Вынужденные колебания маятника.

на свободный конец ножовки надеть листик картона (фиг. 21). В этом случае колебания почти сразу прекратятся, если же картон снять, то продолжительность колебаний при том же начальном отклонении возрастает во много раз.

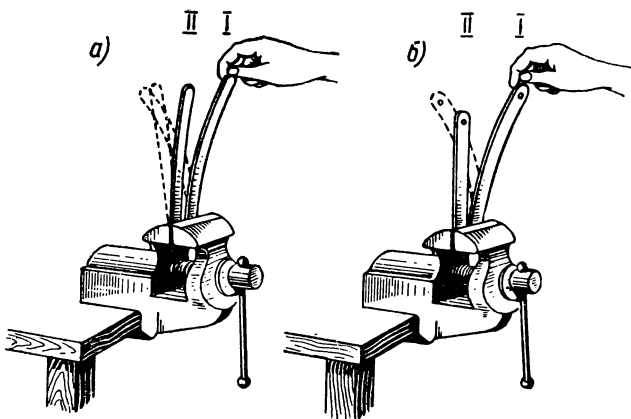
Следовательно, собственные колебания — это колебания, возникающие под действием внешнего толчка, колебания, которые с течением времени постепенно прекращаются, затухают. Частота (число полных колебаний в секунду) в основном зависит от жесткости и массы (веса) колеблющегося тела.

Если нитку, на которой спокойно подвешен груз, держать в руке (фиг. 22, а) и слегка периодически двигать рукой из стороны в сторону, то груз будет совершать столько же колебаний в секунду, сколько и рука, в этом случае частота колебаний груза равна частоте возбуждающей силы (руки). Такие колебания называются *вынужденными* и в рассматриваемом случае они будут незначительными.

Если же руку с ниткой (фиг. 22, б) двигать так же часто, как колеблется сам груз при собственных колебаниях на неподвижном подвесе (фиг. 19), то даже при небольших колебаниях руки груз раскачается очень сильно. *Такое явление, когда частота колебаний возмущающей силы (руки) совпадает с частотой собственных коле-*

баний, называется резонансом. Из фиг. 22 видно, что амплитуда A_1 много больше амплитуды A_2 . Вынужденные колебания возникают всегда, когда есть возмущающая периодическая сила, но они будут большими (с большой амплитудой) только тогда, когда частота возмущающей силы приближается к частоте собственных колебаний (резонанс). Вынужденные колебания продолжаются до тех пор, пока действует возмущающая сила. Если мы прекратим раскачивать рукой конец нити, то колебания быстро затухнут (прекратятся).

Явление вынужденных колебаний и резонанса можно наблюдать при опытах с тем же ножовочным полотном. Нужно изношен-



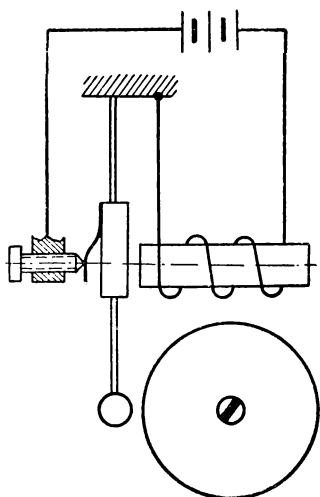
Фиг. 23. Вынужденные колебания ножовочного полотна.

ное ножовочное полотно разломать точно пополам и обе половинки зажать рядом в тиски так, чтобы свободные концы были одинаковой длины. Если затем одно из ножовочных полотен отвести в сторону (фиг. 23, а, полотно I) и отпустить, то, как и в предыдущих опытах, полотно начнет совершать собственные колебания. Колебания первого полотна I несколько раскачивают тиски и хотя колебания тисков будут ничтожны, все же они создадут периодическую силу нужной частоты, и поэтому второе полотно II начнет совершать вынужденные колебания¹. Если свободную длину второго полотна умышленно сделать иной, чем у первого, то даже при интенсивных колебаниях первого полотна второе полотно заметно колебаться не будет (фиг. 23, б). В этом случае резонанс отсутствует, так как частота силы, создаваемой первой ножовкой, много меньше, чем собственная частота второго полотна.

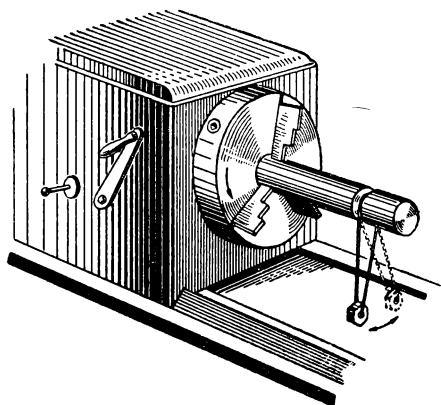
Рассмотрим теперь третью группу колебаний — автоколебания.

¹ Если опыт неудачен, т. е. резонанс не наблюдался, то одинаковость частот обоих полотен можно получить небольшим изменением длины свободного конца одного из них путем легких ударов вдоль полотна до проведения очередного опыта. Опыт более нагляден, когда проводится не в очень массивных тисках.

Автоколебания — это незатухающие колебания; этим они сходны с вынужденными, которые тоже не затухают, пока действует внешняя периодическая сила. Но, с другой стороны, они отличны от вынужденных, так как *автоколебания происходят при отсутствии внешней периодической силы*. Автоколебания, возникающие при токарной обработке, вредны, однако в других областях техники они чрезвычайно полезны. Контур радиоприемника, электрический звонок, скрипка, часы — все это автоколебательные системы. Проследим, как работает электрический звонок (фиг. 24).



Фиг. 24. Электрический звонок.



Фиг. 25. Автоколебания маятника.

При включении тока в катушку электромагнита молоточек электрического звонка притягивается к нему, но конструкция звонка такова, что отклонение молоточка вызывает размыкание и прерывает подачу тока, поэтому молоточек, ударившись о звонок, под действием плоской пружинки, на которой он подвешен, возвращается в исходное положение, благодаря чему вновь замыкается цепь, магнит снова притягивает молоточек, снова размыкается цепь и т. д.

Получить чисто механические автоколебания очень просто, проделав следующий опыт. Если на вал, зажатый в патроне токарного станка (фиг. 25), надеть шнур с грузом на конце и пустить станок, то груз начнет периодически раскачиваться¹. Эти колебания груза будут, очевидно, не собственные (они не затухают, пока вращается вал), но и не вынужденные (отсутствует внешняя периодическая сила). Это — автоколебания.

Проследим, каков механизм колебаний этого маятника (маятника Фруда).

¹ При постановке опыта валику диаметром 50—100 мм с канавкой сообщается относительно медленное вращение — 100—200 об/мин. В качестве шнура лучше использовать кусок провода с резиновой изоляцией.

При запуске станка силы трения, возникающие между петлей шнура и валом и являющиеся силами трения покоя, увлекут петлю с грузом в сторону вращения вала.

Груз будет отклоняться до тех пор, пока момент сил трения покоя не станет меньше момента сил тяжести. Тогда петля с грузом перестанет увлекаться валом, а начнет проскальзывать и, следовательно, силы трения покоя заменятся силами трения движения. Но так как силы трения при относительном движении всегда меньше, чем при относительном покое, то груз начнет под действием силы тяжести двигаться в обратном направлении (навстречу вращению вала). При качении груза вновь наступит такой момент, когда петля и вал будут двигаться с одинаковой скоростью в одном и том же направлении (относительный покой). Тогда силы трения между петлей и валом вновь отклонят груз и т. д. Из опыта видно, что энергия, идущая на раскачивание груза, получается от вращающегося вала вследствие того, что силы трения при подхватывании петли с грузом больше, чем при обратном движении.

Значит, автоколебания — это самовозбуждающиеся колебания, которые происходят при отсутствии внешней периодической возбуждающей силы. Для поддержания автоколебаний нужен источник энергии, причем сами колебания управляют поступлением энергии.

В любой автоколебательной системе можно выделить четыре составляющих части (см. схему ниже):

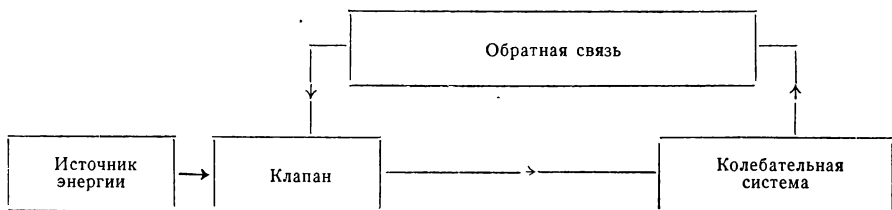
1) источник энергии (для электрического звонка — батарея, для маятника Фруда — вращающийся вал);

2) клапан, т. е. часть системы, регулирующая поступление внешней энергии (у звонка — контакт; у маятника Фруда — переменная сила трения);

3) колебательная система (у звонка — якорь с молоточком; у маятника Фруда — петля с грузом);

4) обратная связь колебательной системы с клапаном (у звонка замыкание и размыкание контакта определяются колебаниями якоря с молоточком; у маятника Фруда изменения коэффициента и силы трения определяются относительным покоем или относительным движением петли с грузом по валу).

СХЕМА АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ



Автоколебания обычно происходят с определенной частотой, которая зависит от жесткости и массы системы. Так, при игре на скрипке высота звука (частота) не зависит от скорости смычка, а определяется только длиной и натяжением струны.

8. Вибрации при точении

Вибрации, которые возникают в процессе резания, могут быть вынужденными колебаниями или автоколебаниями.

Наиболее просто наблюдать вынужденные колебания при фрезеровании. Внешняя возмущающая сила, которая возникает вследствие периодического врезания и выхода зубьев фрезы, может вызвать значительные вынужденные колебания. При токарной обработке могут возникнуть вынужденные колебания под действием возмущающих периодических сил. Такие силы вызываются следующими причинами:

1) переменным характером сил резания; если обрабатываемая поверхность имеет перерывы, то при регулярном чередовании обрабатываемых участков и перерывов возникает периодическая возмущающая сила, которая может вызвать значительные колебания. Частота колебаний будет зависеть от числа оборотов детали и может быть легко подсчитана.

2) центробежными силами; если ротор мотора, шкив привода, патрон или сама деталь плохо уравновешены, то при определенных числах оборотов могут возникнуть сильные колебания; частота колебаний в этих случаях также будет равна числу оборотов неуравновешенной детали в секунду;

3) периодическими силами (толчками) от привода станка, которые возникают из-за плохой сшивки ремней, ошибок в шаге шестерен и т. д.;

4) периодическими силами, передаваемыми через грунт или перекрытие от других станков и машин.

Для успешной борьбы с вынужденными колебаниями необходимо, во-первых, установить, что это вынужденные колебания, а не автоколебания и, во-вторых, определить источник возмущающей силы и уменьшить их величину, что иногда трудно выполнить.

Часто удается уменьшить вынужденные колебания (выйти из резонанса) путем изменения числа оборотов шпинделя, а также путем балансировки роторов электродвигателей, шкивов (полости быстро вращающихся шкивов должны быть обработаны), патронов, деталей и т. д.

Станки высокой точности, во избежание передачи колебаний от других станков или машин ударного действия (кузнечных молотов, ковочных машин и пр.), целесообразно устанавливать на отдельные фундаменты с виброизоляцией в виде деревянных брусьев, шлака или специальных упругих элементов (пружины, резиновые и пробковые прокладки). Виброизоляция будет тем эффективнее, чем мягче упругое основание, т. е. чем ниже частота собственных колебаний станка. При защите станка от машин с периодическим возбуждением необходимо, чтобы собственная частота станка на упругих опорах была в 2—3 раза ниже частоты помех.

Однако при обтачивании уравновешенных деталей на вполне исправном станке все же могут возникнуть сильные вибрации; такие вибрации имеют автоколебательный характер.

Применительно к точению вибрации бывают высокочастотные (фиг. 26) и низкочастотные (фиг. 27). Приведенные фотографии поверхностей и схемы сечения волн, наложенные на фотографии ¹, наглядно показывают различие в длинах волн и, соответственно, в частоте колебаний (длина волн обозначена L). Вибрации высокой частоты (при обычном точении) обычно происходят при высоких скоростях резания (более 150 м/мин); на обработанной поверхности остаются очень мелкие, часто мало заметные, но недопустимые при чистовой обработке гребешки.

Высокочастотные вибрации связаны с колебанием резца. Они сопровождаются высоким пищащим звуком, так как происходят с частотой 1500—4000 колебаний в секунду. Для уменьшения вибраций рекомендуется лучше закреплять резец, не допускать больших вылетов его при установке и большого износа по задней грани, или применять виброгасители, устанавливаемые на резец,

Низкочастотные колебания при точении происходят с частотой, близкой к собственной частоте системы вал — опоры. Они сопровождаются характерным низкочастотным гудением и происходят с частотой 50—250 колебаний в секунду. Чем жестче обрабатываемое изделие и чем выше жесткость передней и задней бабок, тем выше частота. Режимы при обычном точении слабо влияют на изменение частоты, и только при расточке длинными скалками частота несколько зависит от режимов резания.

В настоящее время известны пять причин, влияющих на возникновение и поддержание автоколебаний при резании.

1. Переменное трение между стружкой и передней гранью и между обрабатываемой деталью и задней гранью резца (теория проф. А. И. Каширина).

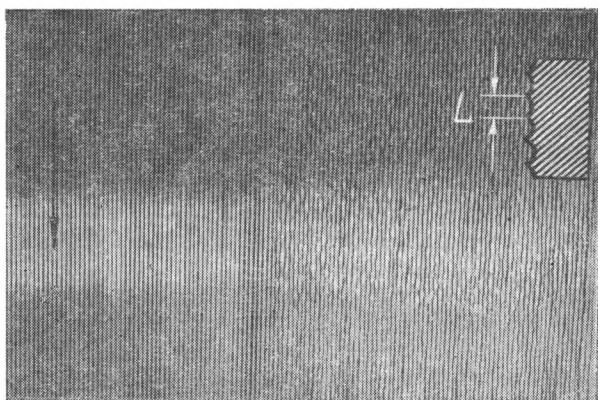
Как известно, силы резания, в значительной мере зависящие от трения стружки и детали о резец, начиная с некоторого значения скорости резания, уменьшаются, что видно из графика (фиг. 28). В связи с этим резец может совершать относительно детали колебания, подобно колебаниям маятника Фруда (фиг. 25), если скорость резания соответствует падающему участку характеристики. По-видимому, падающая характеристика является основной причиной высокочастотных колебаний резца.

2. Переменное значение сил резания при углублении резца в свежий металл и при отталкивании действием слоя повышенной твердости, прилегающего к стружке (теория проф. А. П. Соколовского).

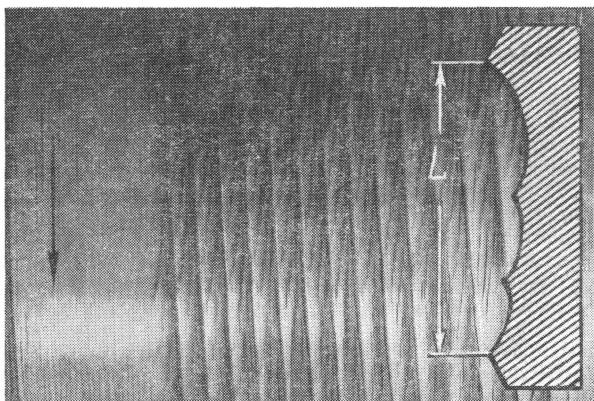
3. Переменные силы резания, возникающие вследствие изменения истинной геометрии инструмента при колебаниях. Характер изменения переднего (γ) и заднего (α) углов в условиях колебаний хорошо виден на фиг. 29. Как видно, при врезании передний угол — больше и значит сила резания будет меньше; при отходе передний угол — меньше, сила резания будет больше. Поэтому за счет разности сил производится положительная работа, идущая на поддержание колебаний.

4. Принцип координатной связи (теория И. Тлустого и В. А. Кудинова). Если тело совершает колебание в плоскости по двум направлениям (см. фиг. 31) и эти колебания не независимы, а связаны друг с другом, то при колебаниях в некоторых случаях может получиться положительная работа за цикл, хотя движения по каждому из этих направлений в отдельности совершались бы с поглощением работы. Наибольшей устойчивостью обладает система, когда направление наибольшей жесткости располагается между нормалью к обработанной поверхности и направлением силы резания. Например, для расточной оправки с переменным сечением (фиг. 30) положение I более устойчиво, а положение II менее устойчиво.

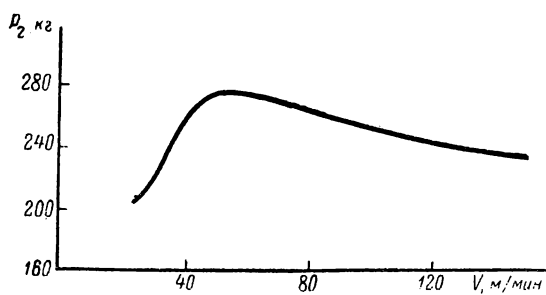
¹ Профиль волн можно получить, если рассечь поверхность плоскостью перпендикулярно оси вала.



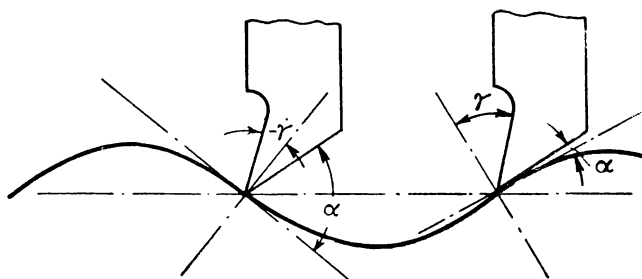
Фиг. 26. Обработанная поверхность со следами вибраций высокой частоты.



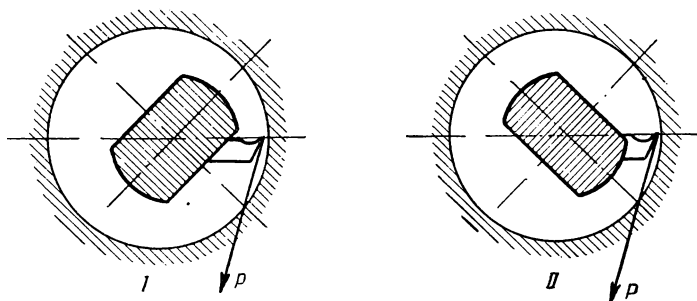
Фиг. 27. Обработанная поверхность со следами вибраций низкой частоты.



Фиг. 28. Зависимость силы резания от скорости
(сталь 40, $t = 4$ мм, $s = 0,28$ мм/об).



Фиг. 29. Изменения геометрии инструмента при резании
в вибрационных условиях.



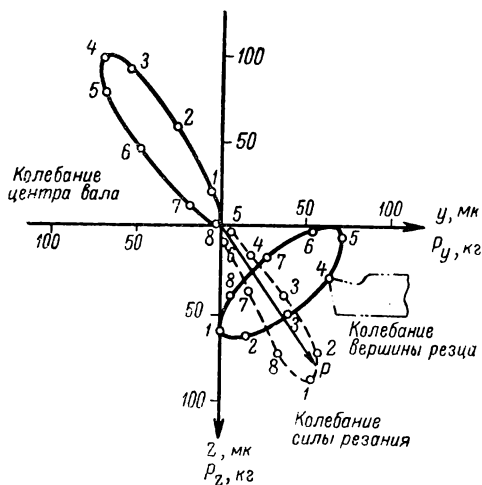
Фиг. 30. Влияние ориентации на устойчивость.

5. Переменные силы создаются благодаря переменной толщине стружки, определяемой неровностью поверхности, полученной на предыдущем обороте. Как показали работы автора, при точении проходными, отрезными и другими резцами решающее значение на развитие вибрации оказывают следы на предыдущих оборотах, благодаря которым в систему вносится 85% всей работы, идущей на колебания, и только 15% вносится силами, указанными в пунктах 1, 2, 3, 4-м.

Ниже подробно рассматривается картина вибраций при точении с учетом влияния на их возникновение лишь одной наиболее важной причины — переменности толщины стружки (см. выше, пункт 5-й).

Проследим, как ведет себя система вал — резец при вибрациях.

При обычном точении в процессе вибраций вал и вершина резца совершают основные колебания одновременно в двух направлениях (фиг. 31): радиальном (по оси Y) и вертикальном (по оси Z).



На фиг. 31 сплошными линиями показаны траектории перемещения центра вала и вершины резца. Пунктирная линия изображает изменение величины и направления силы резания P . Совпадающие во времени положения на кривых отмечены одинаковыми цифрами от 1 до 8.

Как видно из фиг. 31, центр вала и вершина резца в процессе вибраций описывают кривые, напоминающие собой эллипсы.

Фиг. 31. Перемещение центра вала, вершины резца и силы резания при вибрациях.

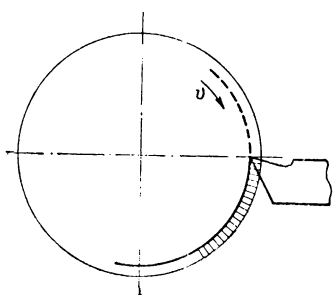
Если проследить за течением процесса, то можно заметить, что от точки 1 до точки 5 вал и резец под действием сил резания расходятся. Происходящее при этом уменьшение толщины срезаемой стружки приводит к уменьшению мгновенных сил резания (вектор из начала координат до точки 5 много меньше, чем до точки 1). Но при положениях центра вала и вершины резца в точках 5 силы резания становятся меньше сил упругости, поэтому вал и резец начинают сближаться от точки 5 до точки 8. При этом толщина стружки снова увеличивается, снова растут силы резания, и далее процесс повторяется.

Следовательно, при точении с вибрациями вал относительно резца совершает не только вращательное движение, но и колебательное, т. е. либо приближается к резцу, либо удаляется от него. В результате на поверхности вала остаются волнообразные следы, подобные тем, какие оставлял песок на бумаге (фиг. 19) при колебаниях маятника и движении листа в направлении, перпендикулярном плоскости колебания.

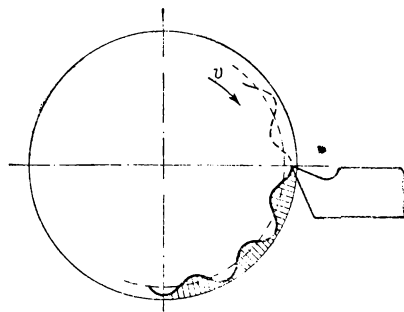
Чтобы лучше уяснить себе процесс образования волн и явления, происходящие в процессе вибраций, мысленно рассечем вал перпендикулярно оси вращения и проследим, какую линию начертит вершина резца, т. е. какой профиль будет иметь поверхность вала при выполнении тех или иных токарных операций.

Если при вращении вала его центр будет находиться на постоянном расстоянии от резца (фиг 32), то вершина резца опишет окружность (вал будет без следов вибраций), силы же в процессе резания не будут изменяться, так как снимаемая стружка будет иметь постоянную толщину.

Теперь проследим, что произойдет, если при обработке ровной цилиндрической поверхности (например, при нарезании резьбы)



Фиг. 32. Схема образования стружки при отсутствии вибраций.



Фиг. 33. Схема образования стружки при вибрациях (нарезание резьбы).

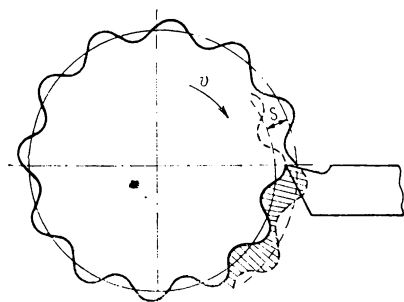
центр вала будет то приближаться к вершине резца, то удаляться от нее (фиг. 33). В этом случае вершина резца оставит на поверхности резания свой след в виде кривой, напоминающей синусоиду. Силы резания будут периодически изменяться, так как в процессе точения будет сниматься стружка переменной толщины.

Необходимо подчеркнуть, что такая связь между перемещением и изменением толщины стружки наблюдается только при нарезании резьбы. При других же токарных операциях изменение толщины стружки, а вместе с тем и сил резания в процессе вибраций будет происходить несколько сложнее.

Проследим за образованием стружки при отрезке. Предположим, что вначале процесс протекал без вибраций, тогда очевидно, что стружка будет постоянной толщины, как изображено на фиг 32. Но если в какой-то момент вал начнет периодически перемещаться относительно резца, т. е. начнутся хотя бы очень незначительные колебания, то в течение первого оборота толщина стружки будет определяться только перемещением вала относительно резца в данный момент (на данном обороте). Короче говоря, в течение первого оборота с начала возникновения колебаний изменение толщины стружки будет происходить так, как указано на фиг. 33, т. е. на первом обороте толщина стружки будет связана с перемещением, как

при нарезании резьбы. В течение же второго оборота с начала возникновения вибраций толщина стружки будет определяться не только перемещением вала относительно резца в данный момент, но и теми неровностями на поверхности резания, которые получились при первом обороте. Ясно, что при втором обороте колебание толщины стружки, а вместе с тем и сил резания будет больше, поэтому вибрации усилятся. На последующем, третьем, обороте произойдет дальнейшее усиление, и так до тех пор, пока не наступят стационарные вибрации, т. е. вибрации постоянной интенсивности.

Такое не мгновенное, а постепенное нарастание вибраций (последовательная раскачка) в начале их возникновения, вероятно, подмечал всякий, кто сталкивался с вибрациями при точении.



Фиг. 34. Схема образования стружки при вибрациях (отрезка).

На фиг. 34 на основании осциллограмм¹ (записей на специальном приборе — осциллографе) приведена схема образования стружки при отрезке. Аналогичное образование стружки будет происходить и при работе проходным и другими резцами.

Как видно из схемы, в результате колебаний, которые были на предыдущем обороте, резец в данный момент (на данном обороте) обтачивает поверхность с последовательно расположенными выступами и впадинами (волны, получившиеся при предыдущем обороте) и, кроме того, продолжают колебания вала относительно резца. Поэтому в данном случае изменение толщины стружки будет больше, чем двойная амплитуда колебаний вала относительно резца.

Напомним, что при нарезании резьбы неровности, получившиеся при нарезании предыдущего витка (т. е. на предыдущем обороте), не будут влиять на нарезание последующего, следовательно, в этом случае изменение толщины стружки будет равно только размаху колебаний резца относительно вала (сравните фиг. 33 и 34).

С точки зрения вибраций, токарные операции можно разделить на две принципиально различные группы: «точение по следу» и «точение по-чистому».

К первой группе относятся операции, выполняемые отрезным, проходным, подрезным и другими резцами, т. е. все операции, в которых образование стружки связано не только с колебаниями на данном обороте, но и со следами вибраций, получившимися на предыдущем обороте.

Ко второй группе надо отнести нарезание резьбы, так как в этом случае следы, получившиеся при предыдущем обороте, не сказыв-

¹ Схема образования стружки построена на основании осциллограмм, полученных авторами в ЛПИ им. М. И. Калинина при обтачивании проходным резцом.

ваются на образовании стружки в данный момент, т. е. не влияют на течение вибрационного процесса.

Как видно из схемы (фиг. 34), благодаря наличию определенного сдвига между колебаниями на предыдущем и на данном оборотах ¹ стружка, срезаемая резцом, имеет непостоянную толщину. При чем при сближении резца с валом («врезание») резец снимает стружку малой толщины; при отходе («отталкивание») резец снимает стружку большей толщины. Очевидно, что силы резания при «врезании» тоже будут меньше (тоньше стружка), чем при «отталкивании», благодаря чему совершается работа, которая и идет на поддержание колебаний.

Строго говоря, увеличение сил резания при «отталкивании», по сравнению с силами резания при «врезании», будет несколько большим, чем должно получиться только на основании разной толщины стружки. Это связано с не совсем одинаковыми условиями резания при «врезании» и «отталкивании», как было упомянуто в пунктах 1, 2, 3, 4 при описании причин возникновения автоколебаний (стр. 47). Поэтому при «точении по-чистому» (например, при нарезании резьбы) тоже могут возникнуть вибрации, однако при равных условиях их интенсивность будет значительно меньше, чем при «точении по следу»; меньшая виброустойчивость при «точении по следу» объясняется, как уже указывалось, тем, что 85% работы, идущей на поддержание вибраций, получается из-за следов на предыдущем обороте.

Следует отметить, что вся энергия, идущая на поддержание колебаний, составляет 1—3% от всей работы, затрачиваемой на резание.

Необходимо еще остановиться на следующей интересной стороне образования стружки при вибрациях. Как отмечалось раньше, неодинаковость толщины стружки при «врезании» и «отталкивании» происходит благодаря тому, что колебания на данном обороте сдвинуты относительно профиля волн (т. е. колебаний на предыдущем обороте). Такой сдвиг наблюдается всегда при точении по следу при установившихся колебаниях. Если бы такого сдвига не было, т. е. вершины волн совпадали бы с вершинами колебаний, то снималась бы стружка постоянной толщины, и поэтому отсутствовали бы те силы, которые периодически раскачивают вал и резец, т. е. поддерживают колебания. Благодаря такому, причем довольно постоянному, сдвигу между колебаниями на двух соседних оборотах ² отдельные волны образуют на поверхности, обработанной при вибрациях, характерные винтовые полосы.

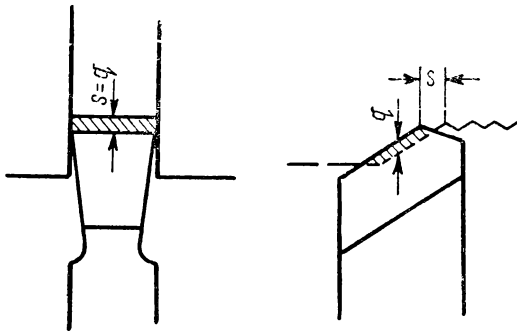
На фиг. 27 ясно видны эти винтовые полосы, а также следы тех колебаний, из которых эти полосы образовались.

¹ Сдвиг между колебаниями на предыдущем и на данном оборотах всегда наблюдается при установившихся вибрациях. Как видно из фиг. 34, этот сдвиг выражается в том, что вершины волн на данном обороте расположены не на одном радиусе с вершинами неровностей.

² Колебания на последующем обороте отстают от волн на поверхности резания, т. е. от колебаний, которые были при предыдущем обороте, примерно на четверть длины волны.

Как было показано, при «точении по следу» решающее влияние на вибрации оказывают следы на предыдущих оборотах, причем вибрации будут непрерывно нарастать и установятся, если интенсивность вибраций будет от оборота к обороту увеличиваться.

Наши теоретические исследования показали, что если отношение амплитуды на последующем обороте к амплитуде на предыдущем обороте больше единицы, вибрации будут возникать.



Фиг. 35. Сечение стружки.

Отношение амплитуды последующего оборота к амплитуде предыдущего по нашим исследованиям приблизительно равно:

$$\frac{A_{n+1}}{A_n} = \frac{0.5 \eta^2}{h \sqrt{n^2 + \eta^2}}, \quad (1)$$

где h — коэффициент, характеризующий затухание, т. е. трение в системе;

$n^2 = \frac{j}{m}$ — жесткость системы, деленная на массу;

$\eta^2 = \frac{P_y}{qm}$ — коэффициент, зависящий от условий резания и равный отношению радиальной составляющей силы резания к толщине стружки в этом же направлении (при единичной массе).

Таким образом, вибрации будут возникать тем труднее, чем меньше η^2 , чем больше h (трение в системе) и чем больше j (жесткость системы). Значит хорошим средством борьбы с вибрациями является увеличение трения в системе (применение виброгасителей) и повышение жесткости упругой системы (станок — деталь — инструмент), а также устранение всех излишних зазоров. Использование более жестких патронов и вращающихся центров, встроенных в пиноль, а также уменьшение вылета пиноли задней бабки и резца во многих случаях позволяет устранить вибрации.

При обычном продольном точении и отрезке интенсивность вибраций будет тем меньше, чем меньше радиальная составляющая силы резания P_y и чем больше «радиальная толщина стружки» q . «Радиальная толщина» при отрезке есть не что иное, как подача; при продольном точении — это толщина стружки, измеренная по радиусу, т. е. перпендикулярно подаче (фиг. 35).

Если составляющую силу резания выразить по формулам теории резания, то

$$\eta^2 = \frac{P_y}{qm} \approx \frac{k \cdot t \cdot R^{0,3}}{s^{0,25} \varphi^2}.$$

На основании этой формулы, а также если учесть влияние на силу резания переднего, заднего углов и скорости резания (которые для упрощения в формулу не введены, но учтены в k), следует, что режимы резания и геометрия инструмента сказываются на интенсивности вибраций следующим образом.

1. Интенсивность вибраций возрастает с увеличением ширины стружки (глубины резания при обычном продольном точении t).

В этом случае колебания растут, так как увеличение ширины стружки приводит к росту сил резания.

2. Увеличение толщины стружки (подачи s) сказывается противоположным образом. При увеличении толщины стружки интенсивность вибраций несколько уменьшается, поскольку в этом случае, хотя силы резания и больше, но перемещение вала относительно резца меньше сказывается на изменении толщины стружки.

3. Уменьшение угла в плане φ приводит к увеличению интенсивности вибраций, так как уменьшение φ приводит не только к уменьшению толщины стружки, но и к изменению направления усилия. При этом увеличивается радиальная составляющая силы резания P_y , увеличение же P_y больше всего сказывается на деформации вала и резца.

4. Увеличение переднего угла несколько снижает интенсивность вибраций (уменьшаются силы резания).

5. Значительное увеличение радиуса при вершине резца R увеличивает интенсивность вибраций, так как, с одной стороны, вызывает небольшой рост сил резания, с другой стороны, на некотором участке дает уменьшение толщины стружки.

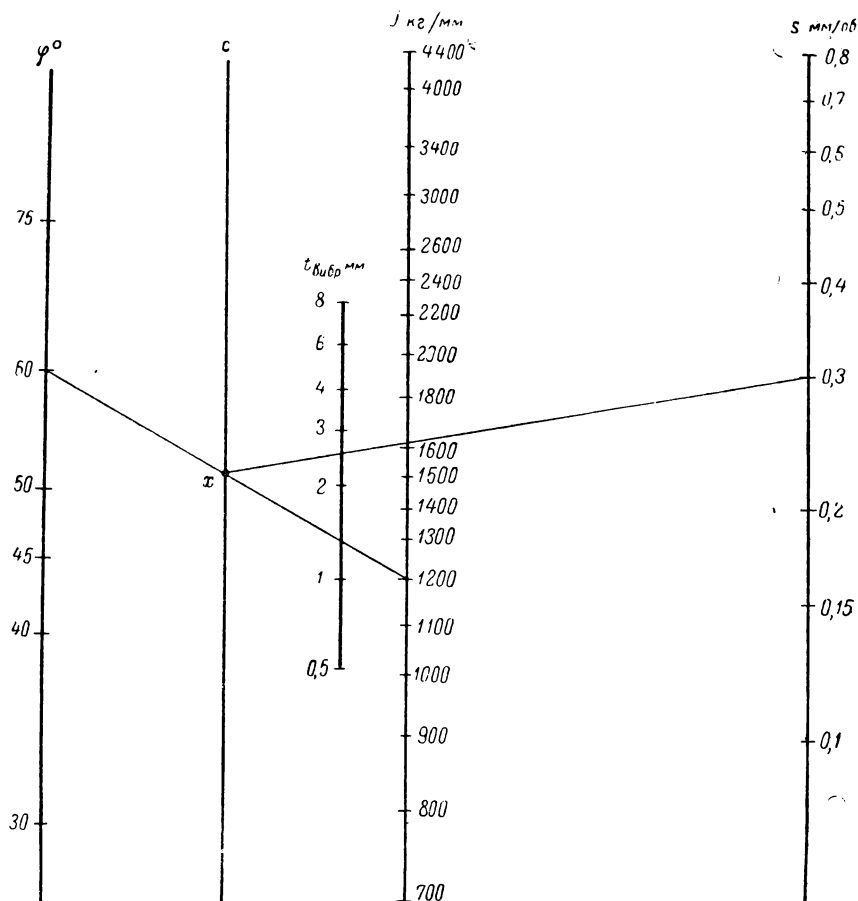
6. Увеличение скорости резания при точении большинства сталей вначале вызывает рост интенсивности вибраций (наибольшие вибрации для стали обычно наблюдаются при скоростях 40—150 м/мин), а в дальнейшем приводит к уменьшению или полному прекращению вибраций.

7. Изменение заднего угла в пределах от 3 до 16° не сказывается на интенсивности вибраций. Однако при уменьшении заднего угла ниже 2—3° вибрации ослабевают. Объяснение такого влияния заднего угла следует искать не в изменении силы резания, а в том, что при малых задних углах врезание резца в металл при вибрациях затрудняется.

Если виброустойчивость системы характеризовать глубиной, при которой возникают стационарные вибрации (амплитуды двух соседних оборотов равны), то положив в формуле (1) отношение амплитуд равным единице, получим выражение

$$t_{\text{вибр}} = \frac{n \cdot h \cdot \varphi^2 \cdot s^{0,25}}{k_1 \cdot R^{0,3}}.$$

По этой формуле, если знать постоянную κ_1 (для данного материала и скорости), можно было бы подсчитать по данным жесткости (j), массе (m), трению в системе (h), углу в плане (φ), подаче (s) и радиусу при вершине (R) ту глубину резания, при которой будут возникать вибрации.



Фиг. 36. Номограмма для определения вибрационной глубины резания.

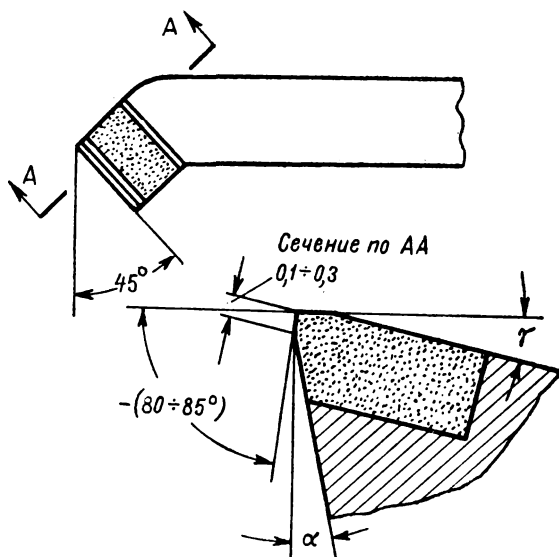
В ЛПИ им. М. И. Калинина были проведены опыты¹ по обтачиванию валов разной жесткости из стали 50 при скорости 90 м/мин твердосплавным инструментом с $R = 0,5 \text{ мм}$. Эти опыты дали возможность получить опытную формулу, подобную теоретической:

$$t_{\text{вибр}} = \frac{j-400}{450} \left(\frac{\varphi}{60} \right)^2 \left(\frac{s}{0,15} \right)^{0,5},$$

¹ Опыты проводились автором и инж. А. М. Шендоровым. Для разных материалов в подобных формулах будут другие показатели. Для упрощения в формуле не учтено влияние радиуса, углов α и γ и скорости резания.

где $t_{\text{вибр}}$ — вибрационная глубина резания в мм;
 j — жесткость системы вал — опоры, т. е. общая жесткость вала и опор в месте точения, в кг/мм;
 φ — угол в плане в градусах;
 s — подача в мм/об.

На фиг. 36 приведена номограмма, которая дает возможность ориентировочно определить вибрационную глубину при заданных j , φ и выбранной подаче. Для нахождения вибрационной глубины резания $t_{\text{вибр}}$ по номограмме поступают следующим образом. Предположим, необходимо узнать, с какой глубиной можно вести обработку резцом с $\varphi = 60^\circ$ вала в центрах при общей жесткости



Фиг. 37. Резец с «виброгасящей» фаской.

вала и опор 1200 кг/мм. Соединяем прямую точки 60 и 1200 на шкалах φ и j , находим точку пересечения x на «слепой шкале» s . Если обработка будет вестись с подачей 0,3 мм/об, то соединяем точку x , найденную на шкале s , с точкой 0,3 на шкале s , и по шкале $t_{\text{вибр}}$ находим, что вибрации будут возникать при глубине резания в 2,5 мм. Значит, для безвибрационной работы обработку необходимо вести при несколько меньшей глубине, например, 2 мм.

Данные, полученные по номограмме, можно принимать как ориентировочные, т. к. если скорость будет очень низкой или значительно выше, а также резец будет немного изношен по задней грани (0,2—0,3 мм), то вибрации будут наступать при несколько большей глубине.

Из вышеприведенных зависимостей и описания влияния отдельных факторов на возникновение вибраций вытекает, что для обеспечения безвибрационной работы следует:

1) создать возможно более высокую жесткость всей системы (станка, патрона, заднего центра, детали и т. п.) и не доводить станки до большого износа;

2) вести обработку на небольших глубинах при относительно больших подачах;

3) работать на высоких скоростях резания;

4) работать резцами с большими главными углами в плане ($\varphi = 45 \div 85^\circ$), большими положительными передними углами и малым радиусом при вершине резца; не допускать значительного затупления резца, но и не работать инструментом с очень острой режущей кромкой.

Для повышения виброустойчивости системы можно искусственно притупить вершину резца. Виброгасящая фаска¹ шириной 0,1 — 0,3 мм затачивается таким образом, что на фаске образуется отрицательный передний угол $80 \div 85^\circ$ (фиг. 37).

9. Специальные средства борьбы с вибрациями

Универсальным средством борьбы с вибрациями является увеличение сопротивления в колеблющейся системе. Так, из опытов с ножовочным полотном было выяснено, что колебания полотна очень быстро прекратились при значительном трении о воздух листа картона на конце колеблющегося полотна.

Общеизвестно, что колебания маятника часов быстро прекратятся, если маятник будет слегка о что-либо тереться. Часы останавливаются в том случае, когда работа, идущая на поддержание колебаний, будет меньше работы трения.

На практике удается избавиться от вибраций, если токарный станок оснастить специальным прибором — виброгасителем. Идея конструкции виброгасителей принадлежит проф. А. П. Соколовскому. Действие виброгасителей основано на значительном увеличении сопротивления при колебаниях вала.

На фиг. 38 показан гидравлический виброгаситель В-1 конструкции лаборатории технологии машиностроения ЛПИ имени М. И. Калинина. В корпусе 1 расточены два отверстия, играющие роль цилиндров, в которые входят два поршня 2. Полости цилиндров, соединенные с нагрузочным цилиндром, а также между собой, заполняются маслом. В нагрузочном цилиндре при помощи винта 7, давящего на пружину, может перемещаться нагрузочный поршень 6.

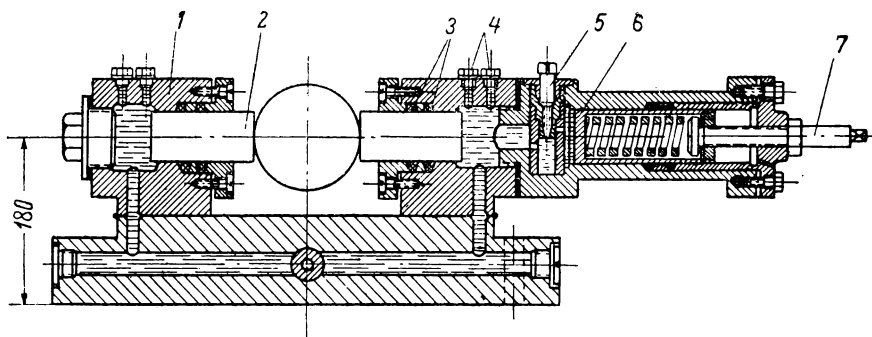
Дроссельный клапан 5 служит для регулирования сечения трубопроводов, соединяющих полости цилиндров. Он был необходим только в опытной конструкции виброгасителя для определения оптимальных сечений. Пробки 4 закрывают отверстия, служащие для заполнения полостей цилиндров маслом и выпуска воздуха при заполнении. Надежные сальники 3 препятствуют вытеканию масла из полостей цилиндров, а также увеличивают трение при перемещении поршней.

¹ Виброгасящая фаска предложена техником-новатором Д. И. Рыжковым.

При вращении за рукоятку винта 7 часть масла выдавливается из нагрузочного цилиндра, благодаря чему поршни 2 могут быть плотно прижаты к поверхности обрабатываемого вала, а в системе может быть создано необходимое давление (обычно рабочее давление 1—2 *атм*).

При возникновении вибраций колебания вала передаются поршням, сопротивления в системе резко возрастают, так как затрачивается работа на трение поршней о сальники, а также — некоторая работа на преодоление гидравлического сопротивления при перетекании масла по каналам.

Виброгаситель работает не как люнет, поскольку он практически не повышает жесткости системы (при медленном перемещении кулачков).



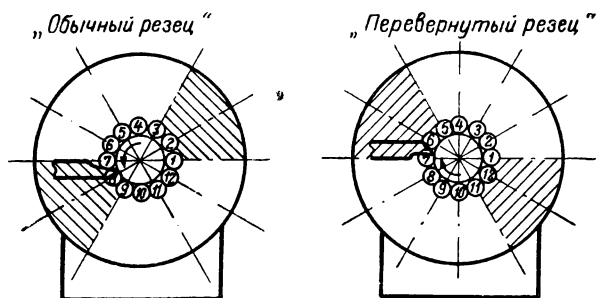
Фиг. 38. Гидравлический виброгаситель для токарного станка В-1.

ков требуется приложить незначительную силу). Поэтому поршни виброгасителя не оказывают значительного сопротивления даже при обтачивании заготовок валов с большим биением. Наличие же пружины, которая нажимает на нагрузочный поршень, допускает обработку валов с большой овальностью, так как нагрузочный поршень, оказывая давление на масло, обеспечивает плотное прилегание рабочих поршней к поверхности деталей. Это же устройство служит для компенсации утечки масла через сальники. В некоторых конструкциях виброгасителей ЛПИ имени М. И. Калинина концы поршней в целях меньшего износа оснащались шариковыми подшипниками. Однако для валов низкой жесткости плоские кулачки из модифицированного чугуна или древопластиков обеспечивают лучший эффект гашения.

Описание опытной конструкции виброгасителя В-1 приведено только для уяснения принципа его действия. В работе он, хотя и показал хорошие результаты, был неудобен, так как при горизонтальном расположении кулачков виброгаситель можно было устанавливать на суппорте токарного станка, либо правее, либо левее резца. Но и то, и другое не всегда допустимо, так как при левой установке нельзя близко точить у патрона, при правой — у заднего центра работа будет вестись без виброгасителя, что опасно с точки зрения вибраций.

Исследования показали, что виброгаситель может работать не только при горизонтальном положении цилиндров, но и в том случае, если оси цилиндров расположены под углом к горизонтали. Так, при гашении вибраций круговым виброгасителем¹, у которого цилиндры могли устанавливаться в любом из двенадцати положений (фиг. 39), было выяснено, что при работе «обычным резцом» (обычное вращение) вибрации можно погасить, если цилиндры расположены в положениях 1, 2, 3, 7, 8, 9; при работе же «перевернутым резцом» (обратное вращение) — в положениях 7, 6, 5, 1, 12, 11.

Из фиг. 39 видно, что вибрации можно погасить только в случае, когда цилиндры (или даже один цилиндр) виброгасителя распола-



Фиг. 39. Зоны гашения вибраций.

гаются в секторах, простирающихся от горизонтальной оси на 60° в сторону вращения вала. При постановке же осей цилиндров вне секторов гашения можно уменьшить только вертикальные колебания вала, погасить же вибрации нельзя. Это еще раз подчеркивает, что главными колебаниями являются горизонтальные колебания вала, которые наибольшим образом влияют на изменение толщины стружки.

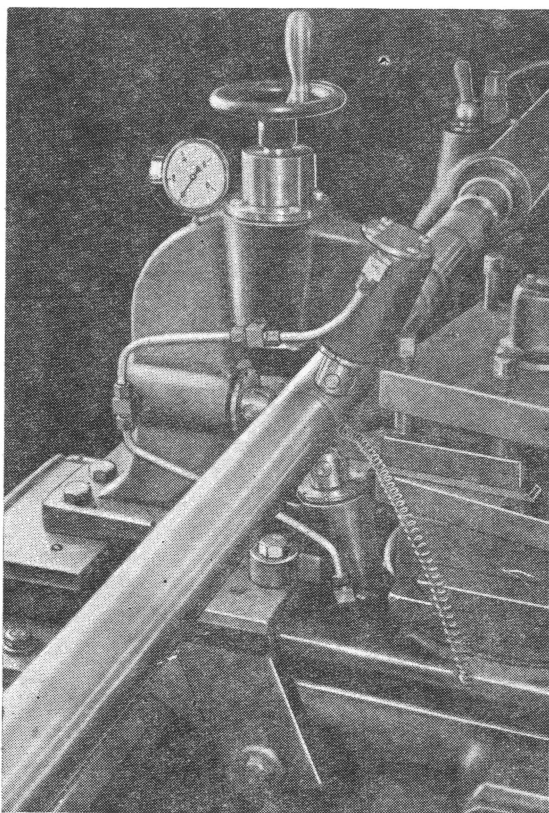
Конструкция виброгасителя получается более удобной для работы, если цилиндры располагать под углом. В этом случае виброгаситель может быть установлен вместо подвижного люнета в плоскости резца, благодаря чему отпадают неудобства, связанные с расположением цилиндров рядом с резцом.

При обтачивании относительно коротких валов достаточно одного или двух цилиндров, расположенных в секторах гашения (при «обычном резце» фиг. 39, положение 2). При обтачивании же очень длинных валов малой жесткости вибрации лучше гасятся при постановке третьего цилиндра вне сектора гашения, который обеспечивает лучшую фиксацию вала между поршнями, а также препятствует вертикальным колебаниям вала (при «обычном резце» положения 2, 9, 5 фиг. 39).

На фиг. 40 приведена фотография, показывающая установку виброгасителя с тремя цилиндрами В-5 на токарном станке. Как

¹ Круговой виброгаситель В-2 сконструирован и испытан в ЛПИ имени М. И. Калинина канд. техн. наук доц. И. С. Амосовым.

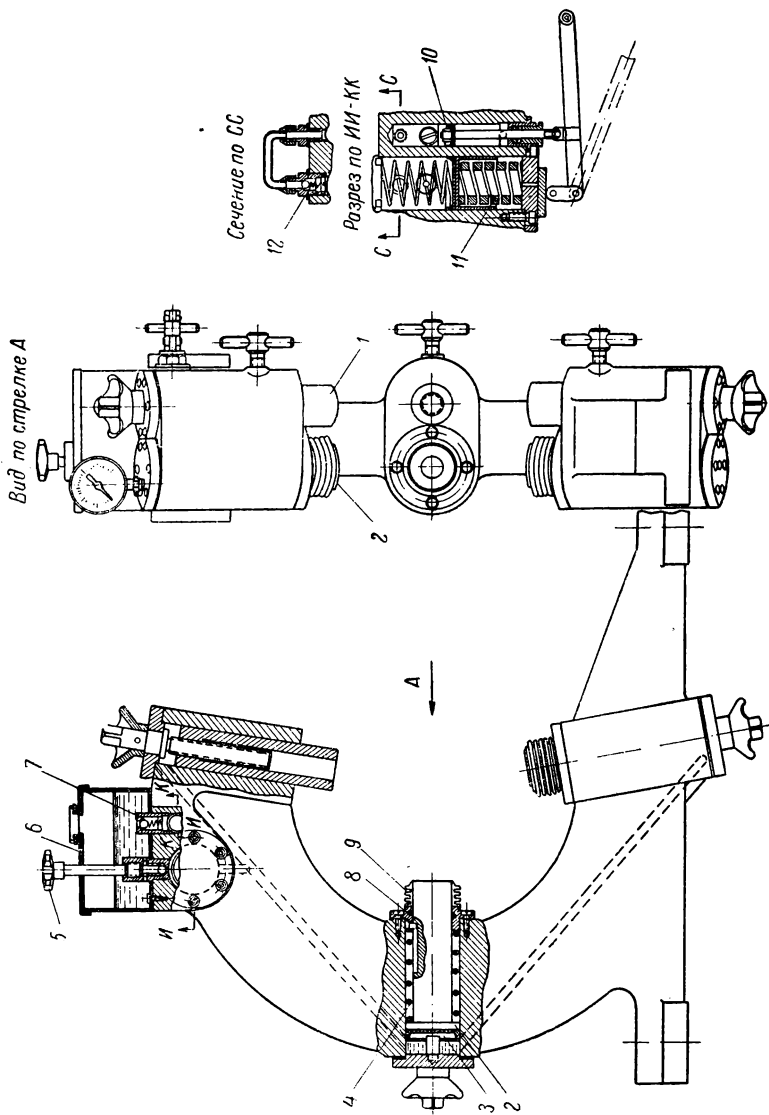
видно из фотографии, вертикально расположенный нагрузочный цилиндр при помощи внешних трубок (а не сверлений) соединен с полостями трех рабочих цилиндров, расположенных друг относительно друга под углом. Такое удачное конструктивное решение дало возможность установить виброгаситель в плоскости резца.



Фиг. 40. Виброгаситель для длинных валов В-5.

На фиг 41 приведен чертеж последней конструкции виброгасителя-люнета В-6¹. В отличие от предыдущей конструкции в одном литом корпусе располагаются не только кулачки виброгасителя 2, но также параллельно им кулачки жесткого люнета 1. Виброгаситель-люнет устанавливается на супорт вместо обычного люнета и может при необходимости выполнять либо функции люнета, либо функции виброгасителя. Такая универсальность очень удобна при обработке длинных валов малой жесткости и высокой точности. Пере-

¹ Виброгасители В-5 и В-6 сконструированы и испытаны в ЛПИ имени М. И. Калинина канд. техн. наук доц. В. Г. Подпоркиным.



Фиг. 41. Виброгаситель-люнет В-6.

мещение жестких кулачков производится, как у обычного люнета, при помощи винтов. Три поршня виброгасителя оснащены для герметичности резиновыми манжетами 3, а для создания необходимого трения — сальниками 8. Пружины 4 служат для отвода кулачков от детали, когда нет давления в системе, гофрированные трубки 9 служат для защиты направляющих от грязи. Перемещение кулачков и прижатие их к обрабатываемой детали и в этой конструкции осуществляется гидравлически. Из резервуара 6 при помощи поршневого насоса 10 с всасывающим 7 и обратным 12 клапанами масло нагнетается в полость нагруженного цилиндра и по каналам поступает к кулачкам. После того как кулачки прижались к валу, происходит сжатие сильной пружины 11 нагруженного цилиндра. Такая конструкция обеспечивает поддержание постоянного необходимого давления в системе (3—4 *атм*) при возможных колебаниях в размере и форме вала, а также компенсирует возможную утечку масла во время работы. При необходимости отвести кулачки открывают кран 5 и масло вытекает в резервуар, а кулачки отводятся пружинами.

Виброгаситель применялся для гашения вибраций, возникающих при скоростном обтачивании очень длинных, относительно тонких валов, при значительных глубинах резания. Так, на судостроительном заводе им. А. М. Горького благодаря применению виброгасителя В-6 при одном неподвижном люнете производилось обтачивание валов диаметром 70 мм и длиной 7 м со скоростью 150 м/мин при подаче 0,25 мм и глубине резания 1—2 мм. Без виброгасителя обтачивание могло производиться только при постановке нескольких неподвижных люнетов и то только на очень низких скоростях резания при малых глубинах резания.

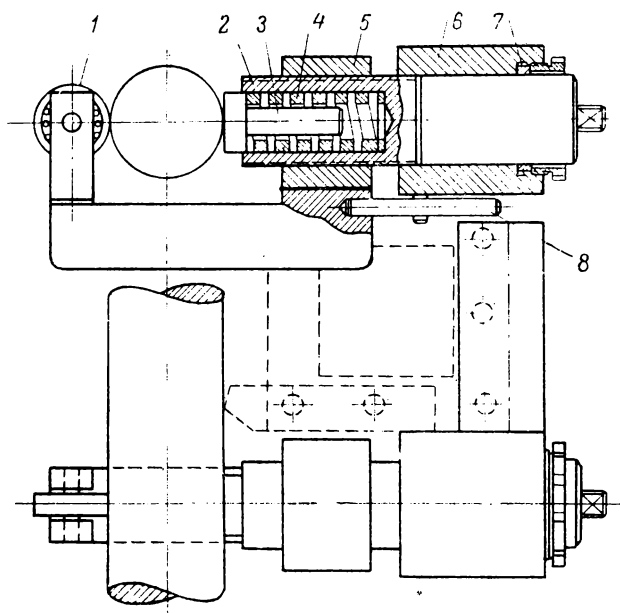
Необходимо отметить, что виброгаситель-люнет не может работать одновременно и как люнет, и как виброгаситель. Если жесткие кулачки плотно прижать к валу, то тогда кулачки виброгасителя не смогут перемещаться относительно корпуса при возникновении вибраций, и поэтому ими не будет производиться работа (нет перемещения) и не будет отбираться энергия, вибрации гаситься не будут. Весьма прост по конструкции виброгаситель трения¹. Как видно из фиг. 42, корпус виброгасителя 6 закрепляется рядом с резцом прямо в резцедержателе. В отверстие корпуса входит шток 2, на резьбу которого навернута скоба 5 (от проворачивания при работе скоба удерживается стержнем 8).

Если ввинчивать шток в скобу за рукоятку, которая насаживается на хвостовик, то обрабатываемый вал можно плотно зажать между шарикоподшипником 1 и кулачком 3. При возникновении вибраций вместе с валом начнет перемещаться скоба со штоком. Кожаная манжета 7 создает несколько повышенное трение, которое приведет к увеличению затухания колебаний вала, благодаря чему вибрации гасятся. Пружина большой жесткости 4 обеспечивает плотное прижатие шарикоподшипника и кулачка к валу даже при

¹ Виброгаситель трения В-4 сконструирован в ЛПИ имени М. И. Калинина канд. техн. наук доц. О. В. Роман на основании его экспериментальных исследований.

значительной овальности обрабатываемой заготовки. Применение такого простого виброгасителя, который можно изготовить без больших затрат, во многих случаях давало возможность работать без вибраций. Обработка тех же валов и на тех же режимах, без виброгасителя, сопровождалась интенсивными вибрациями.

Для крупных станков в ЦНИИТМАШ также была разработана конструкция виброгасителя¹, действие которого основано на силе



Фиг. 42. Виброгаситель трения В-4.

трения (фиг. 43). Здесь сопротивление создается за счет трения в пакетах тарельчатых пружин. При перемещении винтами ползунов в корпусе виброгасителя сжимаются тарельчатые пружины малой жесткости, которые при вибрациях трутся друг о друга и «мешают» колебаться валу. Сильные спиральные пружины служат только для предохранения тарельчатых пружин от разрушения. Необходимо отметить, что хотя эти приборы и называются виброгасителями, их надо включать в действие не столько для гашения уже развившихся вибраций, сколько заранее для предотвращения возникновения вибраций. Дело в том, что если работа трения в виброгасителе и будет маленькая, но больше, чем прирост энергии за цикл, вибрации не разовьются.

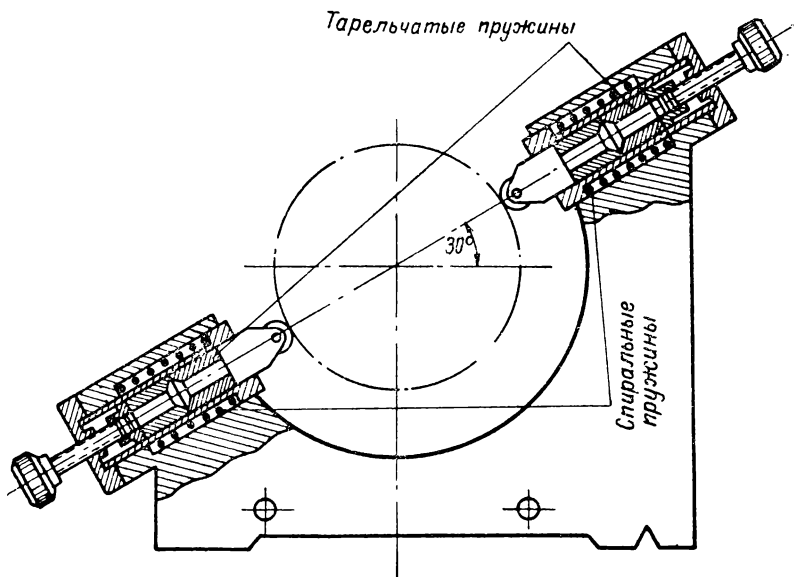
Все вышеописанные виброгасители могут с успехом применяться только для борьбы с вибрациями низкой частоты. Дело в том, что кулачки виброгасителей затрудняют только колебания вала, которые при низкочастотных вибрациях являются главными.

¹ Конструкция предложена канд. техн. наук А. К. Кучмой.

Для борьбы с высокочастотными вибрациями, которые, как указывалось, связаны с колебаниями резца, необходимо препятствовать колебаниям самого резца.

На практике в некоторых случаях удастся избавиться от высокочастотных вибраций, если оснастить резец динамическим виброгасителем.

На фиг. 44 приведена простая конструкция виброгасителя ВР¹ для проходных и подрезных резцов. Виброгаситель состоит из болта 1, резьба которого может ввинчиваться либо прямо в тело



Фиг. 43. Виброгаситель ЦНИИТМАШ.

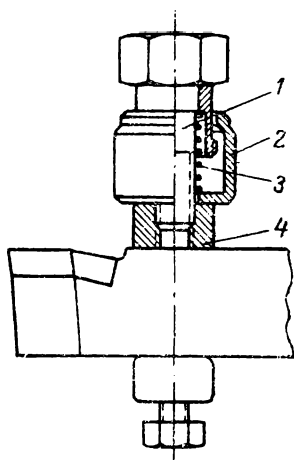
резца, либо в специальную скобу 4 (скоба крепится к телу резца.) На болт надет колпачок 2, который прижимается к основанию пружиной 3. Таким образом, динамический виброгаситель представляет дополнительную упругую систему (пружина и колпачок), которую связывают с колеблющимся резцом. При высокочастотных колебаниях резца дополнительная система также начинает колебаться; при этом энергия колебания распределяется между обеими системами. Если дополнительная система имеет такую же собственную частоту, как резец, т. е. находится в резонансе, то колпачок будет очень сильно раскачиваться и принимать значительную долю энергии колебаний резца на себя. Всегда присутствующее трение и соударение деталей будет помогать уменьшению колебаний.

Гасители колебаний, работающие на подобном же принципе, применяются при гашении колебаний в машинах и даже для уменьшения поперечной качки крупных кораблей.

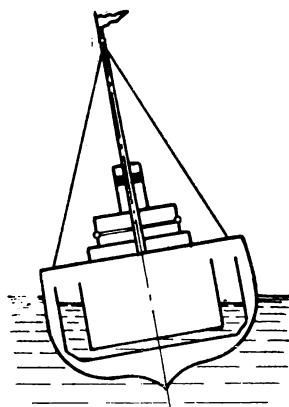
¹ Виброгаситель ВР сконструирован Д. И. Рыжковым.

Как видно из фиг. 45, корабль для уменьшения качки снабжается специальными резервуарами, которые соединяются трубой. Система наполняется водой. При качании корабля вода будет перетекать из резервуара в резервуар (в противофазе), благодаря чему часть энергии колебаний корабля будет передаваться на колебания воды в резервуарах. Колебания корабля станут меньше.

Кроме виброгасителей для борьбы с вибрациями применяют пружинные резцы, которые во многих случаях дают возможность



Фиг. 44. Динамический виброгаситель ВР.



Фиг. 45. Динамические виброгасители на корабле.

либо совсем избавиться от вибраций, либо уменьшить их интенсивность.

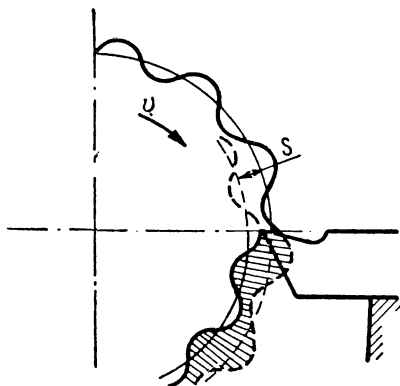
Пружинные резцы обладают пониженной жесткостью и поэтому, естественно, снижают общую жесткость системы.

На первый взгляд кажется, что пружинные резцы должны способствовать возникновению вибраций, а не препятствовать их возникновению, т. е. кажется, что действие пружинного резца не должно отличаться от действия плохого супорта. Однако это не так. Между нежестким супортом и пружинным резцом существенная разница в том, что собственная частота супорта ниже, а головки пружинного резца много выше частоты вибраций, поэтому при точении головка пружинного резца «успевает» следить за волнами на поверхности резания, получившимися на предыдущем обороте¹, благодаря чему виброустойчивость системы по сравнению с жестким резцом возрастает.

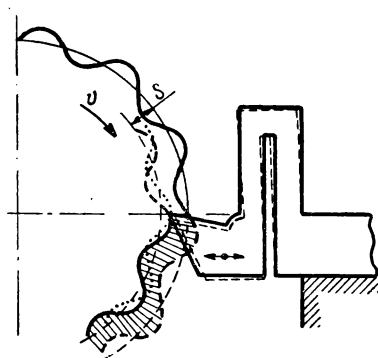
Действительно, проследим, например, за течением вибрационного процесса при отрезке. На фиг. 46 для сравнения приведена схема образования стружки при точении жестким резцом, а на фиг. 47 — при точении пружинным.

¹ При нарезании резьбы будут копироваться неровности, получившиеся при предыдущем проходе.

Как видно из фиг. 47, в тот момент, когда резец снимает более толстую стружку, возросшие силы резания несколько отгибают резец и поэтому вершина резца снимает стружку меньшей толщины, чем это было бы при жестком резце. В тот момент, когда резец снимает стружку меньшей толщины (силы резания меньше), силы упругости пружинной части приближают вершину к центру вала и вершина резца снимает стружку большей толщины. Таким образом, стружка при точении пружинным резцом получается более равномерной толщины, чем при точении жестким резцом. При более равномерной толщине стружки и колебание сил, поддерживающих вибра-



Фиг. 46. Схема образования стружки при вибрациях (точение жестким резцом).



Фиг. 47. Схема образования стружки при вибрациях (точение пружинным резцом).

ции, будет меньше, что приведет к уменьшению или полному уничтожению вибраций.

Токарям давно известны пружинные резцы, однако, они обычно применяются при относительно низких скоростях резания.

Это связано с тем, что большинство употребляемых пружинных резцов имеет малую вертикальную жесткость. Поэтому при больших скоростях резания такие резцы приводят к возникновению вибраций высокого тона, которые, как указывалось, происходят от колебаний самого резца. На фиг. 48 приведена конструкция пружинного резца, который благодаря малому вылету имеет необходимую горизонтальную податливость и высокую вертикальную жесткость. При проведении черногого точения (точность обработки невысока) можно применять резец с плечом $a = 52 \text{ м}$ (жесткость в горизонтальном направлении около 300 кг/мм). При получистовом и чистовом точении нужно применять более жесткие резцы (жесткость 1000 кг/мм и выше, а в этом случае «а» выбирается меньше 40 мм).

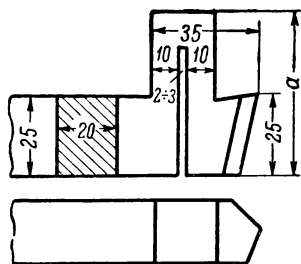
Опыты в ЛПИ¹ показали, что применение пружинного резца ($\varphi = 60^\circ$) с жесткостью 700 кг/мм , дало возможность производить

¹ Конструкция резцов (фиг. 48) и испытание их производились канд. техн. наук доц. О. В. Роман.

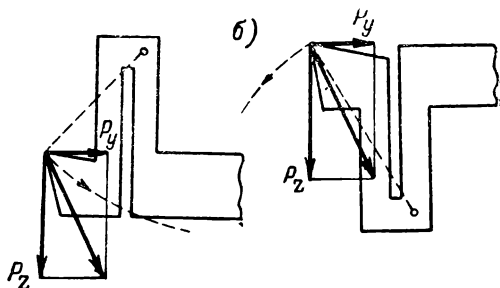
обтачивание вала жесткостью $400 \text{ кг/мм}^2 (l = 1700 \text{ мм}, d = 80 \text{ мм})$ на скорости 95 м/мин и подаче $0,2 \text{ мм/об}$; причем, даже при глубине в 7 мм не возникали вибрации.

При рациональном подборе жесткости резца можно без заметного уменьшения точности добиться увеличения производительности в $5-10$ раз за счет увеличения глубины резания.

При конструировании пружинного резца необходимо иметь в виду, что пружинная часть резца должна располагаться над телом резца, а не под ним (фиг. 49). И вот почему. Не надо забывать, что при вибрациях на вершину резца действуют не только изменяющиеся горизонтальные силы резания (P_y), но и значительно большие изме-



Фиг. 48. Пружинный резец для скоростного точения.



Фиг. 49. Конструкции пружинных резцов.

няющиеся вертикальные силы (P_z), поэтому нужно, чтобы рост P_y и P_z давал вершине резца горизонтальное перемещение в одном направлении.

Из фиг. 49, а видно, что при увеличении толщины стружки обе силы возрастают и отводят вершину от оси вала (моменты сил одного направления), что приводит к уменьшению толщины стружки. Из фиг. 49, б видно, что рост P_y будет отдалять вершину от оси вала, а P_z — приближать, благодаря чему выравнивание толщины стружки будет затруднено.

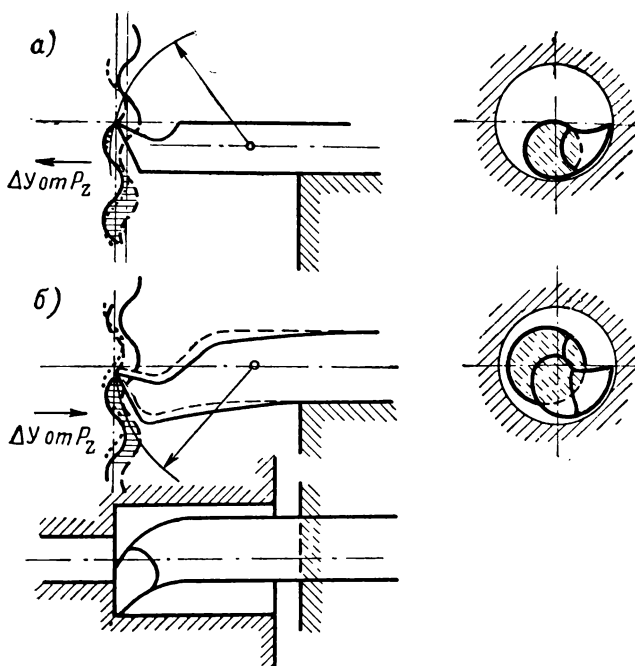
Еще больше внимания надо обращать на вертикальную деформацию резцов с большим вылетом (отрезные, расточные), так как в этом случае при нерациональной конструкции резца вертикальная деформация может привести к заметным горизонтальным перемещениям вершины резца.

На фиг. 50 приведена рациональная конструкция более виброустойчивого расточного резца¹ и схема, поясняющая различие в работе обычных резцов и резцов с низко расположенной режущей кромкой. Как видно из фиг. 50, б, последние могут иметь большее поперечное сечение державки, чем обычные резцы (фиг. 50, а) при растачивании одного и того же отверстия. Но их виброустойчивость в меньшей степени объясняется тем, что перемещение вершины

¹ Резец конструкции токаря К. В. Лакура. Державка резца круглая. Такие резцы удобно устанавливать в «боковую призму».

вниз приводит к уменьшению толщины стружки, тогда как при обычной конструкции резцов те же перемещения приводят к увеличению толщины стружки.

Расточные резцы, как известно, хорошо работают при больших углах в плане (обычно угол в плане $\varphi = 75-85^\circ$), поэтому режущая кромка резца при растачивании снимает стружку как бы с торцевой плоскости.

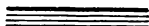


Фиг. 50. Расточной резец и схема образования стружки при вибрациях (точении расточным резцом, $\varphi = 90^\circ$).

На фиг. 50 видно, что в то время, когда резец при вибрациях снимает более толстую стружку (срезает выступы волн, возникающих при предыдущем обороте), возросшие силы резания несколько отгибают резец вниз; вершина резца при этом перемещается не по прямой, а как бы по окружности с центром, где-то на нейтральной оси сечения державки. Если вершина резца расположена выше нейтральной оси сечения тела резца, то перемещение вниз приведет к еще большему увеличению толщины стружки (фиг. 50, а). Если вершина резца ниже нейтральной оси (или на оси), то при увеличении толщины стружки вершина будет отходить от поверхности (фиг. 50, б). При уменьшении толщины стружки вершина поднимается, что приводит к увеличению толщины стружки. Таким образом, резцы с малой вертикальной жесткостью (точнее при больших вертикальных деформациях) при низко расположенной режущей кромке, так же, как

и пружинные резцы с малой горизонтальной жесткостью, будут стабилизировать толщину стружки и тем самым затруднять возникновение вибраций.

Отрезные резцы и вообще резцы, испытывающие значительные вертикальные перемещения вершины из-за малой жесткости для повышения виброустойчивости должны иметь низко расположенную режущую кромку (ниже нейтральной оси сечения), т. е. должны иметь некоторое сходство с изогнутыми строгальными резцами.



ГЛАВА III

ЧИСТОТА ПОВЕРХНОСТИ

В первой главе обращалось внимание на точность выполнения размеров и форм деталей, причем их поверхности считались абсолютно гладкими. В действительности даже на тщательно обработанной поверхности имеются неровности и шероховатости.

Исследования советских ученых (проф. П. Е. Дьяченко, чл.-корр. АН СССР проф. С. В. Серенсена, проф. А. И. Каширина, проф. Исаева, доц. А. А. Маталина и др.), а также результаты эксплуатации машин и механизмов показали, что многие свойства машин в значительной степени зависят от величины, формы и направления шероховатостей поверхности деталей.

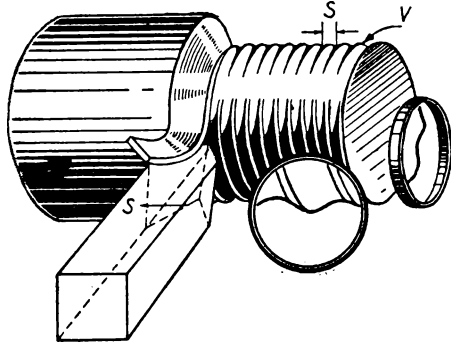
Значительное внимание машиностроителей к чистоте поверхности объясняется тем, что долговечность машин и механизмов зависит от чистоты обработки поверхности. Детали с грубыми трущимися поверхностями быстрее изнашиваются. Высота и форма шероховатостей сильно сказывается на коэффициенте трения и прочности неподвижных посадок. Кроме того, установлено, что детали с плохо обработанными поверхностями быстрее ломаются при ударной и знакопеременных нагрузках. Необходимо отметить, что качество поверхности определяется не только величиной шероховатостей, но и физико-механическими свойствами поверхности (микротвердость, величина и знак остаточных напряжений и т. д.), которые также сказываются на эксплуатационных свойствах деталей машин. На величину шероховатостей приходится обращать внимание не только при окончательной обработке деталей, но и при предварительной обработке, так как высота неровностей всегда должна быть меньше припуска на последующую обработку.

Для того чтобы получить высокую степень чистоты обработки, необходимо иметь отчетливое представление о причинах возникновения шероховатости. Изучение этого вопроса, в свою очередь, связано со знанием того, как и какими средствами производятся оценка степени чистоты поверхности.

10. Образование шероховатостей

На поверхности, обработанной на токарном станке, даже невооруженным глазом можно заметить ряд шероховатостей в виде чередующихся выступов и впадин. Очевидно, что вне зависимости от того, каким резцом ведется обработка, мы при обтачивании производим «нарезание резьбы». Поэтому неровности на поверхности в первом приближении есть не что иное, как след резца в результате главного, вращательного движения и поступательного — движения подачи.

Если мысленно расщечь поверхность вала в направлении подачи s (фиг. 51) и рассматривать сечение при сильном увеличении, то мы увидим ряд выступов и впадин, на-



Фиг. 51. Образование шероховатостей.

поминающих по форме вершину резца, образующих профиль поперечной шероховатости поверхности вала. Если же расщечь поверхность в направлении главного движения, то в сечении образуется линия, близкая к окружности, но с небольшими неровностями, образующими профиль продольной шероховатости, а при наличии вибраций получится профиль с правильными волнами, характеризующими продольную волнистость поверхности. Обычно (при отсутствии вибраций) поперечная шероховатость больше продольной. При рассмотрении поперечной шероховатости обточенной поверхности (фиг. 51) на первый взгляд кажется, что вопрос о высоте гребешков при данной подаче и резце можно очень просто решить геометрически.

Так например, для случая работы резцом с радиусом при вершине (подача меньше, чем радиус), поперечную шероховатость можно геометрически подсчитать из сопоставления двух смежных положений резца в плане, смещенных друг относительно друга на величину подачи. Из фиг. 52, *a* следует:

$$H \approx \frac{s^2}{8R},$$

где H — высота гребешков в мм;

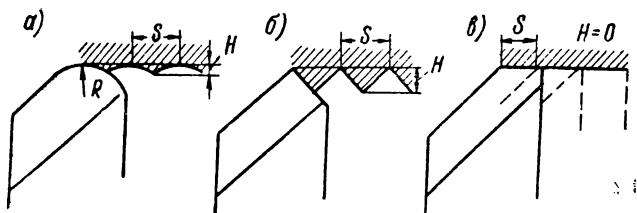
s — подача в мм/об;

R — радиус закругления вершины резца в мм.

При образовании профиля поверхности не только криволинейным участком кромки (фиг. 52, *b*), но и прямолинейными участками, получим иную, более сложную зависимость. Из фиг. 52 наглядно видно, что изменение формы резца будет приводить не только к изменению высоты гребешков, но и к изменению формы шероховатостей.

Казалось бы, что при работе резцом, у которого вспомогательный угол в плане равен нулю (фиг. 52, в), обработанная поверхность вообще не должна иметь шероховатостей. Однако общеизвестно, что практически получить поверхность без всяких шероховатостей на токарном станке нельзя.

Непосредственные измерения показывают, что действительная высота неровностей больше иногда во много раз, чем высота H , вычисленная по формулам, полученным только из чисто геометрических расчетов. Такое расхождение объясняется тем, что при чисто геометрических расчетах не учитываются физические явления, происходящие при образовании гребешков в процессе резания.



Фиг. 52. Схема образования поперечных шероховатостей.

Шероховатость поверхности деталей зависит от большого числа причин, связанных с условиями изготовления. Величина шероховатости и ее характер зависит не только от геометрии инструмента, но и от метода обработки, химического состава и микроструктуры материала, смазочно охлаждающей жидкости, состояния оборудования и т. д.

Все эти причины можно объединить в три основные группы:

1) причины, связанные с геометрией процесса обработки;
 2) причины, связанные с возникновением вибраций инструмента относительно поверхности изделия;

3) причины, связанные с пластической деформацией материала.

Вибрации и пластические деформации искажают геометрически правильную форму и закономерное распределение шероховатостей.

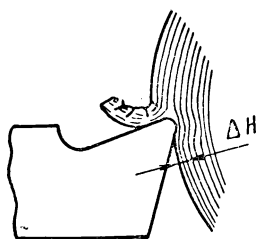
При резании стружка и обрабатываемый материал деформируются как упруго, так и пластически. Пластические деформации поверхностного слоя вызывают дополнительные перемещения частиц в в слоях металла, образующих профиль. Иногда пластические деформации приводят к росту высоты гребешков, так как гребешки «выпучиваются» аналогично тому, как увеличивается наружный диаметр резьбы при нарезании болта или уменьшается внутренний диаметр резьбы при нарезании гайки метчиками. Иногда пластические деформации приводят к тому, что форма гребешков искажается, вершины как бы несколько отгибаются в сторону, противоположную направлению подачи.

Трение по задней грани, особенно при малых задних углах и изношенных резцах, приводит к задирам на обрабатываемой поверхности. Упругие деформации поверхностных слоев металла

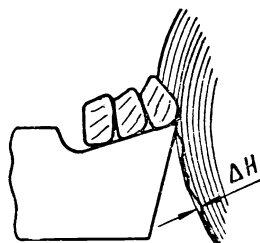
приводят к тому, что за резцом происходит некоторое упругое восстановление материала (фиг. 53).

При образовании микронеровностей металл упруго восстанавливается на гребешке больше, чем во впадине, что приводит к росту микронеровностей.

При обработке хрупких материалов, например чугуна, наблюдается вырывание из основного металла отдельных частиц по граням зерен, что также сказывается на увеличении высоты микронеровностей (фиг. 54).



Фиг. 53. Упругое восстановление при обработке вязких материалов.



Фиг. 54. Выламывание частиц металла при обработке хрупких материалов.

Значительное ухудшение чистоты поверхности происходит при образовании нароста на резце. Нарост, как известно, периодически то образуется, то срывается, прилипая к обработанной поверхности; наличие же «ложного носика» периодически меняет как условия резания, так и форму вершины резца. Это, в свою очередь, вызывает периодическое изменение формы следа резца, что приводит к увеличению микронеровностей.

Кроме вышеперечисленных факторов, на величине микронеровностей сказывается неполная прямолинейность движения супорта, непостоянная деформация всей системы (станок — деталь — инструмент), шероховатость лезвия инструмента, смазка и т. п.

Вибрации, часто возникающие при резании, могут вызвать значительное увеличение продольной, а вместе с тем и поперечной шероховатости. При интенсивных же вибрациях продольная шероховатость может быть даже больше, чем поперечная.

11. Стандартизация чистоты поверхности

В Советском Союзе до 1945 г. не существовало вполне четких критериев, характеризующих чистоту поверхности. Так, с 1928 по 1945 гг. в машиностроении чистота поверхности обозначалась различным числом треугольников (∇ , $\nabla\nabla$, $\nabla\nabla\nabla$, $\nabla\nabla\nabla\nabla$) и оценивалась только по чисто внешним признакам. В 1952 г. вступил в действие обновленный стандарт чистоты поверхности ГОСТ 2789—51 (взамен 2789—45), в котором указаны вполне четкие значения в микронах, характеризующие шероховатость (табл. 8).

Размеры шероховатостей поверхностей различных классов чистоты (ГОСТ 2789—51)

Класс чистоты	Обозначение класса чистоты в чертежах	Средняя высота шероховатостей H_{cp} в мк	Среднее квадратическое отклонение $H_{ск}$ в мк
1	▽ 1	Св. 125 до 200	—
2	▽ 2	„ 63 „ 125	—
3	▽ 3	„ 40 „ 63	—
4	▽▽ 4	„ 20 „ 40	—
5	▽▽ 5	„ 10 „ 20	Св. 3,2 до 6,3
6	▽▽ 6	„ 6,3 „ 10	„ 1,6 „ 3,2
7	▽▽▽ 7	„ 3,2 „ 6,3	„ 0,8 „ 1,6
8	▽▽▽ 8	„ 1,6 „ 3,2	„ 0,4 „ 0,8
9	▽▽▽ 9	„ 0,8 „ 1,6	„ 0,2 „ 0,4
10	▽▽▽▽ 10	„ 0,5 „ 0,8	„ 0,1 „ 0,2
11	▽▽▽▽ 11	„ 0,25 „ 0,5	„ 0,05 „ 0,1
12	▽▽▽▽ 12	„ 0,12 „ 0,25	„ 0,025 „ 0,05
13	▽▽▽▽ 13	„ 0,06 „ 0,12	—
14	▽▽▽▽ 14	„ — „ 0,06	—

Стандарт подразделяет чистоту поверхности, от самой грубой до самой чистой, на 14 классов чистоты. Принадлежность поверхности к тому или иному классу определяется величиной в микронах одного из следующих параметров:

а) средним квадратическим отклонением микронеровностей

$$H_{ск} = \sqrt{\frac{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 + \dots}{n}},$$

т. е. $H_{ск}$ есть корень квадратный из среднего квадрата расстояний точек профиля до средней линии профиля (фиг. 55);

б) средней высоты микронеровностей

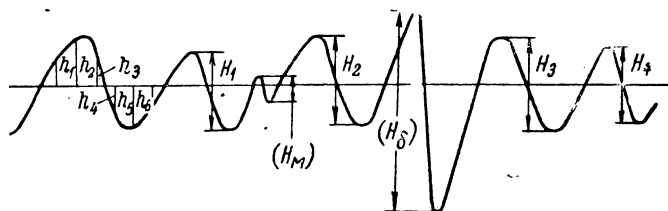
$$H_{cp} = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + \dots}{m},$$

т. е. H_{cp} есть среднее арифметическое высот микронеровностей от гребня до впадины H , причем при определении H_{cp} отдельные сильно отличающиеся от остальных неровности не учитываются (фиг. 55, высоты H_m и H_b не характерны для данной поверхности).

Для наглядности на фиг. 56 приведены фотографии поверхностей первых шести классов чистоты, полученные на токарном станке резцом с большим радиусом при вершине.

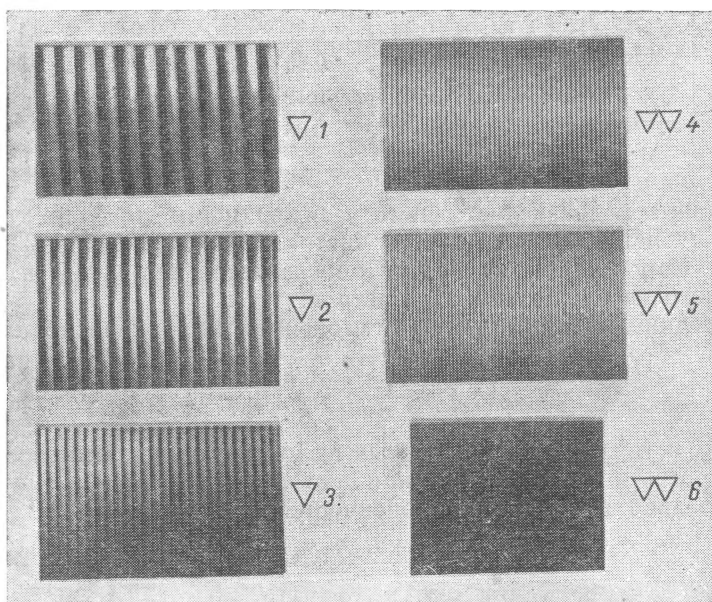
Приведенные в табл. 8 обозначения указывают, что поверхность, обозначенная, например, ▽▽ 4, должна быть выполнена не хуже,

чем по 4-му классу чистоты, т. е. иметь H_{cp} не более 40 мк. Если на чертеже приведено обозначение $\nabla\nabla 4-4$, это значит, что поверхность должна иметь микронеровности именно по 4-му классу чистоты, т. е. H_{cp} — не более 40 мк и не менее 20 мк.



Фиг. 55. Микропрофиль поверхностных неровностей.

Измерение величины микронеровностей в настоящее время может производиться при помощи целого ряда специальных приборов, выпускаемых нашей промышленностью. Одни из них дают возмож-



Фиг. 56. Фотографии поверхностей разных классов чистоты.

ность измерять H_{cp} , другие — $H_{ск}$. Поэтому в стандарте ГОСТ 2789—51 для того, чтобы не производить пересчета, приведены обе эти величины.

В соответствии с Международным стандартом на шероховатость поверхности, принятым в 1956 г., в СССР разработан проект нового стандарта.

В проекте стандарта:

1. Отменяется критерий $H_{ск}$ и вводится новый критерий — среднее арифметическое отклонение h_m :

$$h_m = \frac{|h_1| + |h_2| + |h_3|}{n},$$

т. е. h_m есть среднее значение из суммы абсолютных величин расстояний от точек профиля до средней линии профиля (отклонения h суммируются без учета алгебраического знака отклонений).

Переход от $H_{ск}$ к h_m связан с тем, что профилометры для определения h_m проще по конструкции, чем для определения $H_{ск}$. В то же время переход от $H_{ск}$ к h_m не вносит принципиальных изменений в работу предприятий, т. к. для большинства обработанных поверхностей эти величины близки. Для синусоидального профиля $\frac{H_{ск}}{h_m} = 1,11$.

2. Даются несколько другие численные значения $H_{ср}$ и h_m для классов чистоты.

3. В обозначениях чистоты на чертежах аннулируются треугольники и дается только один знак чистоты для всех классов, обозначаемых цифрами.

Другие изменения в проекте здесь не помещаем.

12. Приборы для контроля чистоты поверхности

Приборы для контроля чистоты поверхности можно разделить на две группы:

1) приборы, основанные на принципе ощупывания исследуемой поверхности при помощи алмазной иглы (профилометры Киселева КВ-7, Чамана ПЧ-2 и профилограф Левина ИЗП-21 и др.).

2) приборы, основанные на оптическом методе (двойной микроскоп Линника МИС-11, микроинтерферометр Линника МИИ-1, микроскопы сравнения и др.).

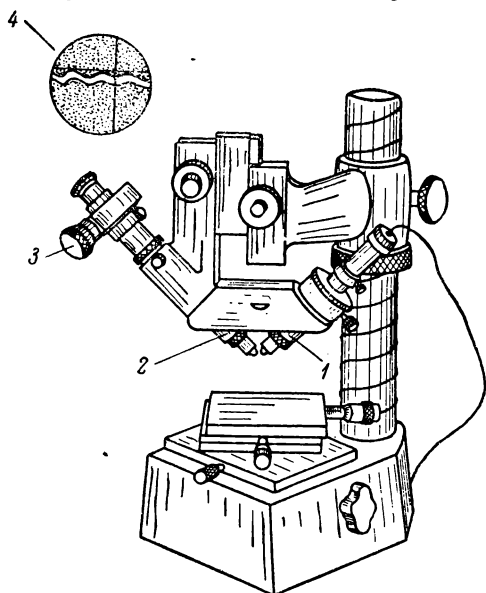
Рассмотрим принцип работы и область применения некоторых типичных приборов.

Двойной микроскоп МИС-11 (фиг. 57) предназначен для измерения микронеровностей 3 ÷ 9-го классов чистоты на наружных плоских и цилиндрических поверхностях.

Действие двойного микроскопа основано на принципе светового сечения. Метод светового сечения заключается в том, что при освещении поверхности узким пучком лучей из правого осветительного тубуса 1, расположенного к поверхности под некоторым углом, световая полоска будет наблюдаться через левый микроскоп 2, в виде ломаной линии (см. на фиг. 57 поле зрения 4). Эта ломаная световая полоска представляет собой след пересечения освещаемой поверхности плоскостью светового потока. Величина искривления может быть измерена окулярным микрометром микроскопа 3. На основании нескольких измерений высот отдельных гребешков (H) может быть подсчитана $H_{ср}$.

Профилометр Чамана ПЧ-2 (фиг. 58) предназначен для измерения чистоты обработанной поверхности. При помощи профилометра можно производить измерение как наружных поверхностей (плоских и цилиндрических, диаметром от 6 мм и выше), так и внутренних (диаметром свыше 60 мм). Прибор состоит из измерительной головки, укрепленной на рукоятке, и усилителя со стрелочным прибором.

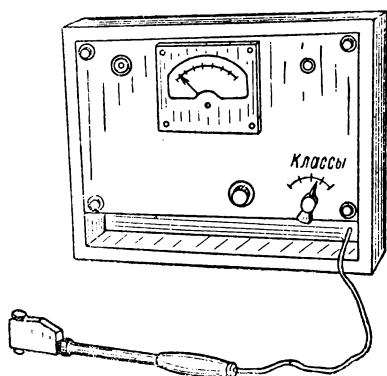
Находящаяся в измерительной головке алмазная игла связана с индуктивным датчиком. Если иглу легко прижать к измеряемой поверхности, и медленно перемещать измерительную головку по этой поверхности, то в рабочей катушке датчика возникнет электродвижущая сила, пропорциональная скорости вертикального смещения иглы. Напряжение от датчика подается на вход усилителя и после выпрямления — на стрелочный прибор. По показаниям прибора можно найти $H_{ск}$ и, следовательно, определить класс чистоты. Конструкция профилометра позволяет производить измерения не только в лаборатории, но и в цеховых условиях.



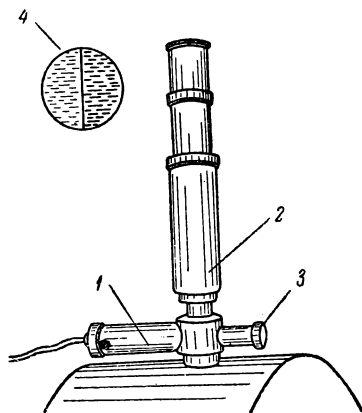
Фиг. 57. Двойной микроскоп МС-11.

ней части которого расположен осветитель 1 и держатель для эталона 3. При работе микроскоп устанавливается непосредственно

Микроскоп сравнения МС-48 (фиг. 59) предназначен для сравнения чистоты поверхности деталей с эталонами. Микроскоп сравнения состоит из тубуса 2, в нижней части которого расположен осветитель 1 и держатель для эталона 3.



Фиг. 58. Профилометр ПЧ-2.



Фиг. 59. Микроскоп сравнения МС-48.

на исследуемую поверхность. Лампа осветителя одновременно освещает исследуемую поверхность и эталон. Благодаря полупрозрачному зеркальцу, установленному перед объективом микроскопа, в поле зрения одновременно видна поверхность детали и эталона

(см. фиг. 59 — поле зрения 4 разделено пополам). Микроскоп сравнения даст возможность в цеховых условиях производить оценку чистоты поверхности с 5 по 13-й класс значительно точнее, чем невооруженным глазом.

В условиях цеха для контроля чистоты поверхности при обработке большого количества деталей очень часто применяется метод сравнения либо с эталонами чистоты (фиг. 56), либо, что лучше, с образцами без применения приборов. В этом случае образцы чистоты должны быть изготовлены из того же материала и тем же технологическим методом, что и контролируемая деталь. Чистота поверхности таких образцов должна быть определена в лаборатории при помощи одного из приборов и соответствовать грубому пределу того класса чистоты, для контроля которого предназначен образец. Удобно в качестве образцов использовать одну из деталей партии. Сопоставление поверхностей с образцами невооруженным глазом может с успехом производиться до 6-го класса чистоты. При контроле поверхностей 7—9-го классов сравнение удобно производить при помощи лупы или микроскопа сравнения.

13. Влияние режимов резания на высоту микронеровностей

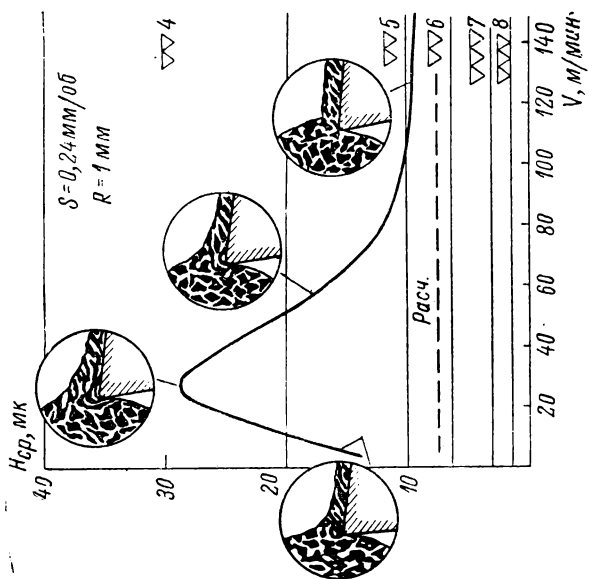
Влияние подачи. Общеизвестно, что при точении увеличение подачи вызывает увеличение микронеровностей обработанной поверхности. Влияние подачи на шероховатость в значительной степени связано с чисто геометрическими расчетами.

На фиг. 60 приведен график зависимости $H_{ср}$ от подачи s , полученный при точении стали 45 проходными резцами с радиусом при вершине 1 мм, при скоростях резания 90 и 20 м/мин. На том же графике нанесена зависимость $H_{ср}$ от подачи, подсчитанная по формуле, учитывающей только геометрические соображения.

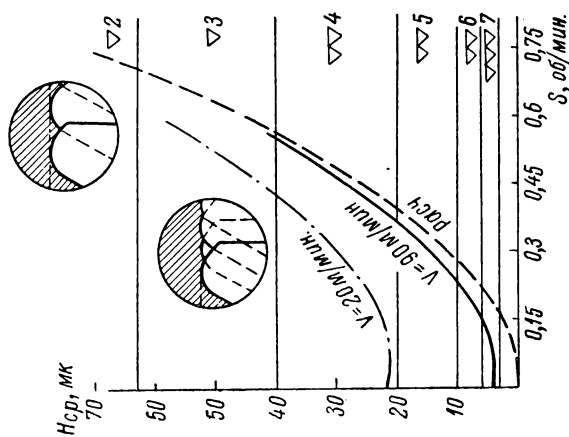
Из графика видно, что шероховатость поверхности резко возрастает с увеличением подачи. В области больших подач экспериментальные и расчетные кривые близки. В области же малых подач между экспериментальной и расчетной кривыми имеется значительное расхождение. Такое расхождение показывает, что при малых подачах величина шероховатости определяется не столько геометрическими расчетами, сколько характером пластических и упругих деформаций поверхностного слоя. Этот же график показывает, что в области малых подач уменьшение подачи мало сказывается на уменьшении микронеровностей, поэтому при чистовом точении практически беспечно уменьшать подачи ниже 0,15—0,05 мм/об.

Сравнение двух экспериментальных кривых ($v = 90$ м/мин и $v = 20$ м/мин) показывает, что в диапазоне подач до 0,15 мм/об значительно больше на шероховатость поверхности влияет изменение скорости по сравнению с изменением подачи.

Влияние скорости. Скорость резания при точении разных материалов по-разному влияет на высоту микронеровностей. Очевидно, что скорость резания будет больше сказываться при обработке ма-



Фиг. 61. Зависимость высоты шероховатостей от скорости (по данным проф. П. Е. Дьяченко).



Фиг. 60. Зависимость высоты шероховатостей от подачи (по данным проф. П. Е. Дьяченко).

териалов, у которых процесс стружкообразования протекает неодинаково при разных скоростях.

Для того чтобы установить влияние скорости на высоту микронеровностей, производят обтачивание одним и тем же резцом, при неизменной глубине резания и подаче, но при разных скоростях резания, и замеряют высоту шероховатостей.

Исследования показывают, что при обработке сталей кривая зависимости микронеровностей (фиг. 61) от скорости резания имеет горбообразный характер. При очень низких скоростях (около 1—2 м/мин) температура в зоне резания развивается сравнительно низкая. Процесс отделения стружки скалывания (элементарная стружка) происходит сравнительно легко без значительной деформации поверхностных слоев металла. Форма впадин шероховатостей близка к форме вершины резца. Микронеровности незначительны и близки к расчетным. При увеличении скорости резания до 20—30 м/мин происходит резкое ухудшение чистоты поверхности. Такое резкое ухудшение чистоты поверхности вызвано изменением характера стружкообразования. Увеличение скорости резания вызывает значительное повышение температур в зоне резания. Высокая температура и значительные давления в зоне резания (много тысяч кг/мм²) создают условия для пластической деформации. Слои пластичного металла обтекают вершину, скользя по передней грани, и тормозятся силами трения; наиболее близкие слои слипаются с передней гранью, так что течение металла в стружку происходит не по передней грани, а по слоям заторможенного металла. Образуется застойная зона — так называемый нарост.

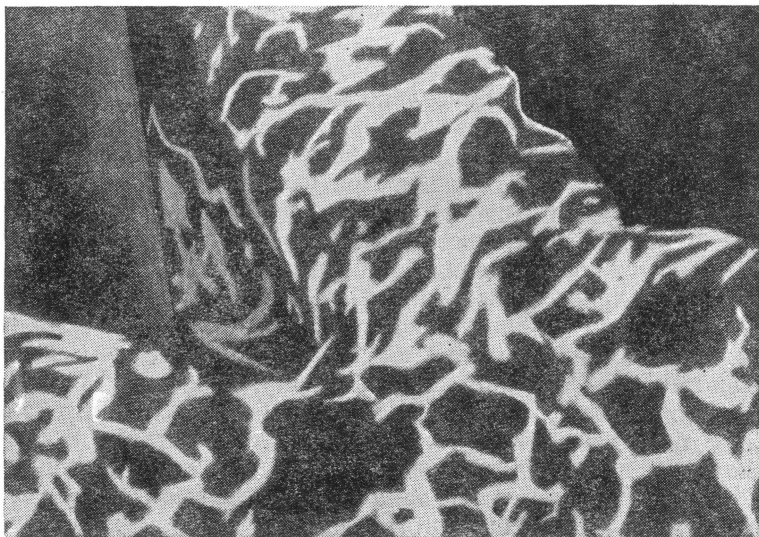
На фиг. 62 приведена фотография, на которой хорошо виден нарост, а также пластическое течение металла в зоне резания. В процессе резания все новые слои металла привариваются к наросту — и этот «фальшивый носик» растет, достигая максимально возможной величины для данных условий. Чрезмерно выросший нарост разрушается и, слипаясь частично со стружкой, частично с обработанной поверхностью, уносится. После этого процесс образования нароста продолжается. Шероховатость поверхности будет большей, так как впадины образуются непрерывно меняющейся вершиной резца, создавая нерегулярность профиля обработанной поверхности. Пластические деформации слоев обработанного металла и приварившиеся к поверхности частички нароста также сказываются на увеличении микронеровностей.

Дальнейшее увеличение скорости, как это видно из фиг. 62, приводит к уменьшению микронеровностей. Увеличение скорости резания приводит к увеличению количества тепла, выделяемого в процессе стружкообразования, и к росту температуры самого нароста. Поэтому прочность нароста падает, и он будет ломаться (увлекаться стружкой) при меньшей высоте. При еще большем увеличении скорости (примерно с 60 до 120 м/мин) нарост вообще образовываться не будет. Чистота поверхности возрастет.

Для большинства углеродистых конструкционных сталей наибольшая высота микронеровностей соответствует скорости 20 м/мин;

у некоторых сталей максимум шероховатости сдвинут в сторону малых скоростей, так что кривая имеет просто спадающий вид.

При обработке чугунов и бронз увеличение скорости резания сопровождается небольшим уменьшением высоты неровностей профиля обработанной поверхности. Отсутствие здесь горбообразной зависимости объясняется высокой хрупкостью, при которой скорость резания слабо влияет на процесс стружкообразования.



Фиг. 62. Пластическое течение металла в зоне резания (по данным проф. П. Е. Дьяченко).

Влияние глубины резания. Влияние глубины резания при обычном точении слабо сказывается на высоте шероховатостей и практически может не приниматься во внимание. Только при очень тонких стружках 0,02—0,04 мм, вследствие наличия притупления на режущей кромке резца, резец перестает нормально резать, отжиматься и начинает «скользить» и «скрести» обрабатываемую поверхность. Процесс сопровождается вибрациями, которые резко снижают чистоту поверхности.

14. Влияние геометрии режущего инструмента на высоту микронеровностей

Влияние радиуса при вершине резца. Из геометрических соображений следует, что с увеличением радиуса высота микронеровностей должна непрерывно снижаться. Так, на фиг. 63 пунктирная линия дает теоретическую кривую, полученную по формуле $H = \frac{s^2}{8R}$. Однако измерения показывают, что хотя высота микронеровностей и уменьшается с увеличением радиуса, но уменьшение

высоты происходит медленнее, чем это должно следовать только из геометрических соображений (экспериментальные кривые на фиг. 63 даны сплошной и штрих-пунктирной линиями). Такое расхождение объясняется тем, что с изменением радиуса изменяется и степень деформации металла в зоне образования стружки, вследствие изменения формы среза. Увеличение радиуса вызывает уменьшение толщины среза (срез будет иметь форму запятой), кроме того, увеличение радиуса приведет как бы к уменьшению угла в плане. Горизонтальная составляющая силы резания возрастет. Рост горизонтальной составляющей приведет к увеличению деформаций детали, станка и поверхностного слоя металла, а иногда может вызвать вибрации. Все это приведет к тому, что высота микронеровностей будет больше, чем следует из расчета.

Из фиг. 63 хорошо видно, что резкое улучшение чистоты поверхности при увеличении радиуса происходит только в области малых радиусов, но, несмотря на это, хороших результатов можно добиться при работе резцами с радиусом при вершине 50—100 мм.

Так, в лаборатории технологии машиностроения ЛПИ имени М. И. Калинина¹ при точении проходными резцами с радиусом при вершине около 100 мм и подачах 3 мм обычно чистота поверхности получалась не ниже 6-го класса. Радиусные проходные резцы дают возможность работать при больших подачах и удобны в установке.

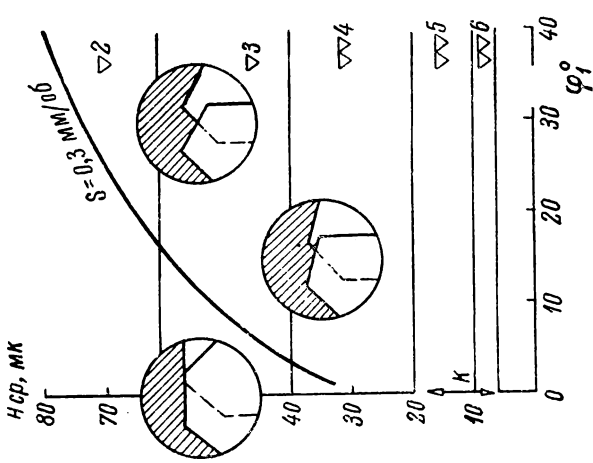
Влияние главного и вспомогательного углов в плане. Углы в плане оказывают влияние на высоту микронеровностей лишь в том случае, если гребешки образуются не только закругленной вершиной резца, но и прямолинейными участками главной и вспомогательной режущих кромок. Таким образом, углы в плане оказывают значительное влияние лишь при работе с большими подачами.

На фиг. 64 приведен график, из которого видно, что с уменьшением вспомогательного угла в плане φ_1 высота неровностей снижается, причем в области малых углов более резко.

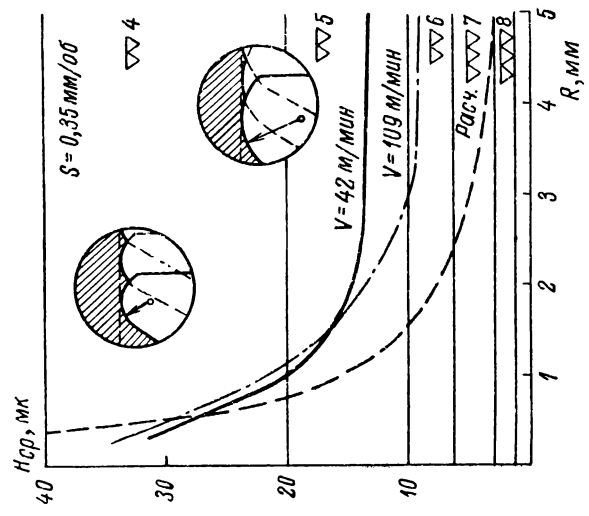
Сравнение трех изображений режущей кромки при различных вспомогательных углах в плане показывает, что если уменьшить φ_1 до нуля, микронеровностей на поверхности вообще не должно быть. Очевидно, что практически при $\varphi_1 = 0$ микронеровности все же будут, как уже неоднократно отмечалось.

Шероховатость определяется не только геометрическими факторами, но также целым рядом факторов, связанных с процессом стружкообразования. Кроме того, при $\varphi_1 = 0$ на величину шероховатости будет значительно влиять невозможность совершенно точно установить режущую кромку параллельно движению подачи, а также шероховатость режущей кромки. Но все же при очень малых углах в плане можно получить даже при больших подачах весьма чистую поверхность. Так, при точении резцами Колесова, у которых, как известно, дополнительная прямолинейная режущая кромка устанавливается параллельно направлению подачи, можно при

¹ Радиусные резцы конструкции канд. техн. наук доц. О. В. Романа.



Фиг. 64. Зависимость высоты шероховатостей от вспомогательного угла в плане φ_1 .



Фиг. 63. Зависимость высоты шероховатостей от радиуса при вершине (по данным проф. А. И. Исаева).

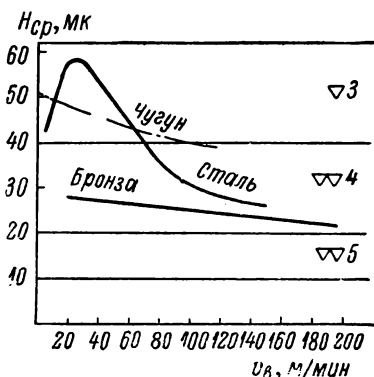
подачах в несколько миллиметров добиться 5—6-го классов чистоты (на фиг. 64 чистота поверхности, полученная резцом Колосова, отмечена буквой К).

Главный угол в плане будет влиять на чистоту поверхности аналогично вспомогательному. Широкие резцы (т. е. резцы, у которых $\varphi = 0$) даже при подачах 6 мм/об и более при чистовом точении дают весьма чистую поверхность. Так, при точении широкими резцами с наклонной режущей кромкой конструкции ЛПИ имени М. И. Калинина чистота поверхности при $s = 3$ мм/об, $t = 0,2$ мм и $v = 300$ м/мин получилась не ниже 7-го класса чистоты, но можно добиться и 8-го класса.

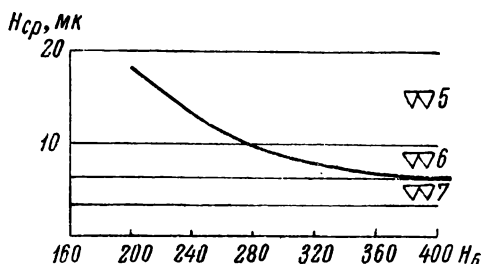
15. Влияние обрабатываемого материала

Общеизвестно, что если одним и тем же резцом при одинаковых режимах обрабатывать разные материалы, то чистота поверхности при обработке будет различной.

Из графика (фиг. 65) хорошо видно, насколько отличается высота микронеровностей при обработке стали, чугуна и бронзы. Наименьшие неровности получаются у хрупкого, мелкозернистого, однородного материала — бронзы. Сталь в области низких скоростей и на-



Фиг. 65. Зависимость высоты шероховатостей от скорости при обработке стали, чугуна и бронзы (по данным канд. техн. наук С. А. Поликарпова).



Фиг. 66. Зависимость высоты шероховатостей от твердости (по данным проф. А. И. Исаева).

ростообразования имеет микронеровности примерно в два раза большие, чем бронза. При высоких скоростях резания отсутствует нарост, зона пластической деформации меньше, температура в зоне резания выше; все это приводит к тому, что шероховатости получаются более однородными. Поэтому высота микронеровностей у стали лишь несколько больше, чем у бронзы. Микронеровности у чугуна даже при больших скоростях много больше, чем у бронзы. Большая шероховатость и нерегулярность профиля поверхности у чугунов вызвана тем, что в процессе резания происходит выламывание отдельных крупных зерен из неоднородного обрабатываемого материала.

Термическая обработка значительно сказывается на чистоте поверхности. Установлено, что высота шероховатостей уменьшается при увеличении твердости. Из графика (фиг. 66) хорошо видно, что увеличение твердости углеродистой стали 45 за счет нормализации привело к уменьшению микронеровностей примерно в два раза. Особенно значительно влияние твердости при увеличении примерно до $H_B = 300 \text{ кг/мм}^2$. При такой твердости объем пластической деформации сравнительно невелик, и дальнейшее повышение твердости обрабатываемого материала мало сказывается на чистоте поверхности. Высота неровностей будет в большей степени определяться геометрией инструмента и подачей, а не пластическими деформациями.

Влияние твердости обрабатываемого материала сказывается также в том, что с увеличением твердости снижается влияние скорости на высоту микронеровностей. Так, при твердости $H_B = 185 \text{ кг/мм}^2$ увеличение скорости сильно сказывается на уменьшении высоты микронеровностей; при твердости $H_B = 228 \text{ кг/мм}^2$ влияние увеличения скорости незначительно. Поэтому при необходимости вести обработку на относительно низких скоростях необходимо производить нормализацию конструкционных сталей. На чистоту поверхности значительное влияние оказывает химический состав обрабатываемого материала. Так, составляющие, уменьшающие вязкость материала (сера, фосфор), приводят к уменьшению высоты микронеровностей.

16. Влияние состояния режущей кромки

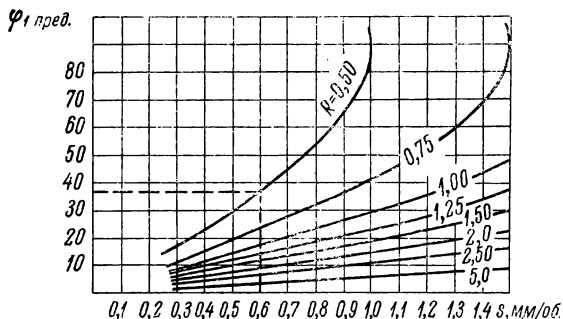
Состояние режущей кромки значительно сказывается на величине и форме шероховатостей, особенно при чистовой обработке. Неровности режущего лезвия полностью переносятся на обрабатываемую поверхность, создавая дополнительные неровности к тем, которые образуются от других причин.

Поэтому при работе с малыми подачами, а также при больших подачах (широкие резцы, резцы Колесова) резцы должны качественно затачиваться и доводиться. При этом размеры шероховатостей самого лезвия инструмента должны быть меньше шероховатостей, допустимых на обрабатываемой поверхности (по крайней мере на 1—2 класса «чище»). При этом надо иметь в виду, что микронеровности самого лезвия значительно больше микронеровностей передней и задней граней (в 2—10 раз). Поэтому чистота поверхности граней резцов после доводки должна быть не ниже, чем по 8—9 классам чистоты по ГОСТ. Высокая чистота поверхности режущих граней инструмента благотворно сказывается на стойкости инструмента, а также на уменьшении нароста при обработке вязких материалов (резцы для обработки алюминия, меди должны тщательно доводиться).

Значительное затупление резцов приводит к росту шероховатостей в 1,5—2 раза. Начальный же износ по задней грани (до 0,5 мм) несколько снижает величину шероховатостей.

17. Определение микрогеометрии по номограммам

В заключение необходимо отметить, что ввиду невозможности определения высоты неровностей путем геометрического расчета (см. фиг. 61, 63) за последнее время сделано несколько попыток выразить необходимые зависимости в виде номограмм. Пользуясь номограммой¹ (см. фиг. 68), определим высоту микронеровностей для случая точения со скоростью $v = 100$ м/мин при подаче $s = 0,6$ мм/об (сталь 45, $\sigma_b = 180$ кг/мм²)². Резец с радиусом при вершине $R = 0,5$ мм, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 20^\circ$.



Фиг. 67. График для нахождения $\varphi_{1пред}$ в зависимости от подачи s и радиуса при вершине φ .

Раньше чем приступить к пользованию номограммой, необходимо выяснить, участвует ли в образовании микронеровностей только криволинейная часть вершины резца, или также участок вспомогательной кромки. По графику на фиг. 67 можно найти наибольший (предельный) вспомогательный угол в плане, при котором не участвует в резании вспомогательная режущая кромка. Для $R = 0,5$ мм и $s = 0,6$ мм/об, $\varphi_{1пред} = 37^\circ$.

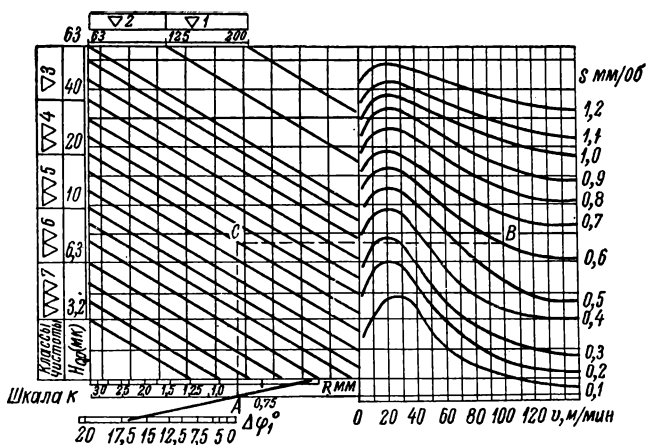
Находим $\Delta\varphi$ по формуле

$$\Delta\varphi = \varphi_{1пред} - \varphi = 37^\circ - 20^\circ = 17^\circ.$$

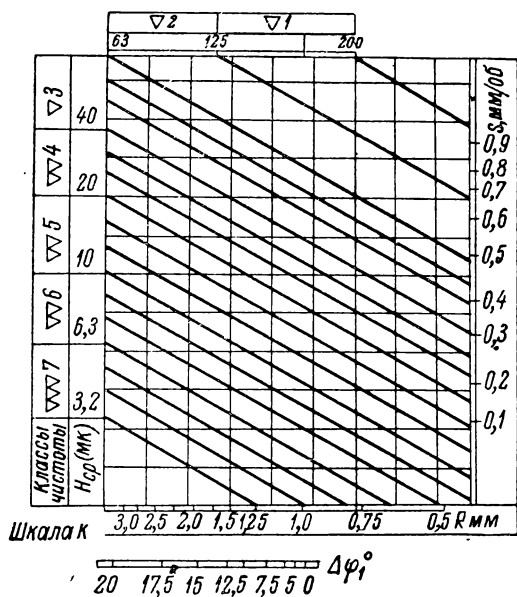
Теперь выполняем следующее построение (фиг. 68). На нижней шкале отмечаем только что найденное значение $\Delta\varphi = 17^\circ$ и соединяем отмеченную точку с точкой, соответствующей $R = 0,5$ мм на вышележащей шкале. Отмечаем точку A пересечения соединительной прямой со шкалой k . Через точку A проводим вертикальную линию. На правой части номограммы из точки 100 ($v = 100$ м/мин) проводим вертикальную линию до пересечения с кривой для подачи $s = 0,6$ мм/об. Через точку B проводим горизонтальную линию до пересечения с ранее проведенной вертикальной линией на левой

¹ Номограмма предложена проф. А. И. Исаевым.

² Номограммы для сталей иных марок (см. А. И. Исаев, Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием, Машгиз, 1950).



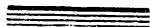
Фиг. 68. Номограмма для определения поперечной шероховатости при точении стали 45.



Фиг. 69. Номограмма для определения поперечной шероховатости при точении алюминия.

части номограммы. Находим точку *C*. Теперь, следуя вдоль наклонной линии, проходящей через точку *C* до левого края номограммы, находим, что при заданных условиях и геометрии инструмента, следует ожидать получения поверхности, чистота которой лежит на границе 4 и 5-го классов по ГОСТ 2789—51.

На фиг. 69 приведена номограмма для определения поперечной шероховатости при точении алюминия. Правая часть у номограммы упрощена, так как скорость при точении алюминия не сказывается на микрогеометрии и поэтому ее не надо учитывать. Методика нахождения классов чистоты подобна вышеописанной.



ЛИТЕРАТУРА

1. Соколовский А. П., Научные основы технологии машиностроения, Машгиз, 1955.
2. Амосов И. С., Экспериментальное и теоретическое исследование вибраций при точении, Лонитомаш, кн. 23, Машгиз, 1951.
3. Кучма Л. К., Экспериментальное исследование вибраций при резании на токарном станке, ЦНИИТМАШ, кн. 15, Машгиз, 1948.
4. Иржи Тлустый, Автоколебания в металлорежущих станках, Машгиз, 1956.
5. Харкевич А. А., Автоколебания, ГИТТЛ, Москва, 1953.
6. Дьяченко П. Е., Качество поверхности при точении, ВНИИ, Москва, ЦБТИ, 1951.
7. Исаев А. И., Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием, Машгиз, 1950.
8. Коллектив авторов, под редакцией канд. техн. наук доц. В. А. Скрагана, Жесткость, точность и вибрации при механической обработке, Машгиз, 1956.



О Г Л А В Л Е Н И Е

Глава I. Точность обработки на токарных станках	3
1. Точность обработки	—
2. Погрешности, связанные с работой токарного станка	7
3. Погрешности, связанные с работой режущего инструмента (токарного резца)	21
4. Погрешности, связанные с обрабатываемой деталью	32
5. Погрешности настройки на размер	34
6. Общие методы повышения точности обработки на токарных станках.	36
Глава II. Вибрации при точении и методы борьбы с ними	39
7. Понятия о колебаниях	40
8. Вибрации при точении	46
9. Специальные средства борьбы с вибрациями	58
Глава III. Чистота поверхности	71
10. Образование шероховатостей	72
11. Стандартизация чистоты поверхности	74
12. Приборы для контроля чистоты поверхности	77
13. Влияние режимов резания на высоту микронеровностей	79
14. Влияние геометрии режущего инструмента на высоту микронеровностей	82
15. Влияние обрабатываемого материала	85
16. Влияние состояния режущей кромки	86
17. Определение микрогеометрии по номограммам	87
Литература	90

Иван Сергеевич Амосов
Василий Александрович Скраган
ТОЧНОСТЬ, ВИБРАЦИИ И ЧИСТОТА ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Редактор издательства *И. А. Бородулина*

Технический редактор *Р. Г. Польская*

Корректор *Л. Р. Кухтевич*

Подписано к печати 20/1 1958 г.

М-02536.

Формат бумаги 60×92¹/₁₆

Печ. листов 5,75

Уч.-изд. листов 6.

Тираж 15 000 экз.

Заказ 3283

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
33	10-я сверху	l — длина обрабаты- ваемого вала в <i>мм</i> , и зависит...	l — длина обрабаты- ваемого вала в <i>мм</i> и зависит . . .	корр.
81	10-я снизу	62	61	авт.

И. С. Амосов, В. А. Скраган. Зак. 3283

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МАШГИЗ**

БИБЛИОТЕЧКА ТОКАРЯ-НОВАТОРА

ПЕРЕЧЕНЬ ВЫПУСКОВ

1. Ансеров М. А., Великанов К. М., Озеркович М. И. Повышение производительности труда и снижение затрат при токарной обработке.
2. Подпоркин В. Г., Большаков С. А., Резание металлов и режущие инструменты.
3. Кучер И. М., Кучер А. М., Токарные станки, их модернизация и автоматизация.
4. Ансеров М. А., Приспособления для токарных станков.
5. Блюмберг В. А., Сергеев М. А., Обработка деталей на токарных станках.
6. Блюмберг В. А., Лакур К. В., Нарезание резьбы на токарных станках.
7. Брейкин Г. А., Пазюк Е. И., Обработка деталей на крупных токарных станках.
8. Пазюк Е. И. Обработка деталей на карусельных станках.
9. Амосов И. С., Скраган В. А., Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке.
10. Сергеев М. А., Никитин П. С., Организация рабочего места токаря и техника безопасности.

2 р. 10 к.



ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Ленинград, ул. Дзержинского, 10