ОСНОВЫ ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Параметры режимов резания при сверлении. Анализ сил, возникающих при сверлении, крутящий момент.

Кафедра «ТОМиС»

Автор: асс.проф. Берг А.С.



ПЛАН ЛЕКЦИИ:

1. Элементы режима резания и среза;
2. Силы резания, момент и мощность при сверлении;
3. Влияние различных факторов на осевую силу и момент;
4. Влияние различных факторов на скорость резания.

1 Элементы режима резания и среза

В процессе сверления различают следующие элементы резания: скорость резания, глубина резания, подача, толщина и ширина стружки.

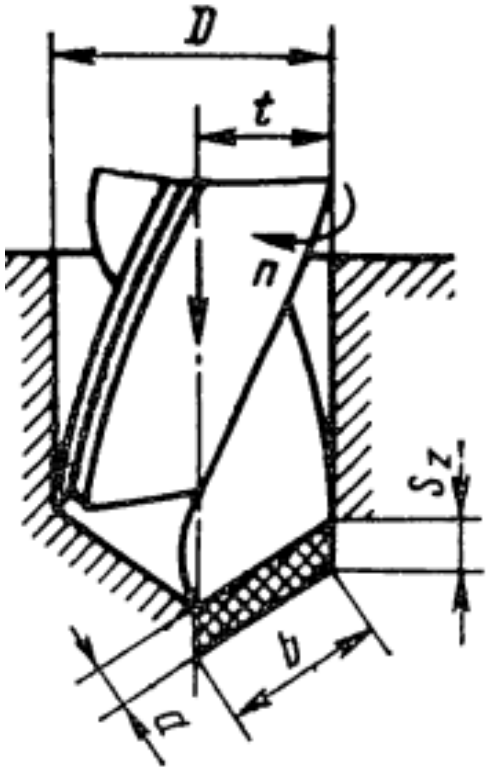

Рисунок 1- Элементы резания при сверлении

Главное рабочее движение сверла (вращательное) характеризуется скоростью резания.

Скорость резания для различных точек режущей кромки сверла различна: на периферии сверла скорость резания наибольшая, а по мере приближения к оси сверла она уменьшается и в центре равна нулю.

За скорость резания принимается окружная скорость точки, наиболее удаленной от оси сверла, рассчитанная по диаметру сверла:

$$v = \frac{\pi D n}{1000}, м/мин,$$

где D – диаметр сверла в мм;

n –частота вращения сверла в об/мин.

Подача — величина перемещения сверла вдоль оси за один его оборот (или за один оборот заготовки, если она вращается, а сверло только перемещается). (S_0, мм/об).

У сверла две главные режущие кромки; подача, приходящаяся на каждую из них,

$$S_z = \frac{S_0}{2}, мм/зуб.$$

Как и при токарной обработке, подачу можно измерять и в миллиметрах за 1 мин (минутная подача):

$$S_м = S_0 n$$

- **Глубина резания** при сверлении определяется диаметром сверла:

$$t = \frac{D}{2}$$

- а при рассверливании отверстия диаметром d:

$$t = \frac{D - d}{2}$$

Толщина среза a измеряется в направлении, перпендикулярном к режущей кромке:

$$a = s_z \sin\varphi = S_0 /2 \cdot \sin\varphi \text{ мм.}$$

Ширина среза b измеряется вдоль режущей кромки и равна ее длине:

$$b = D/2 \sin\varphi \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения среза, приходящаяся на одну режущую кромку,

$$f_z = ab = s/2 \cdot \sin\varphi \cdot D/2 \sin\varphi = D \cdot s/4 \text{ мм}^2$$

Общая площадь поперечного сечения среза, приходящаяся на обе режущие кромки,

$$f = 2f_z = 2\ D \cdot s/4 = D \cdot s/2 \text{ мм}^2.$$

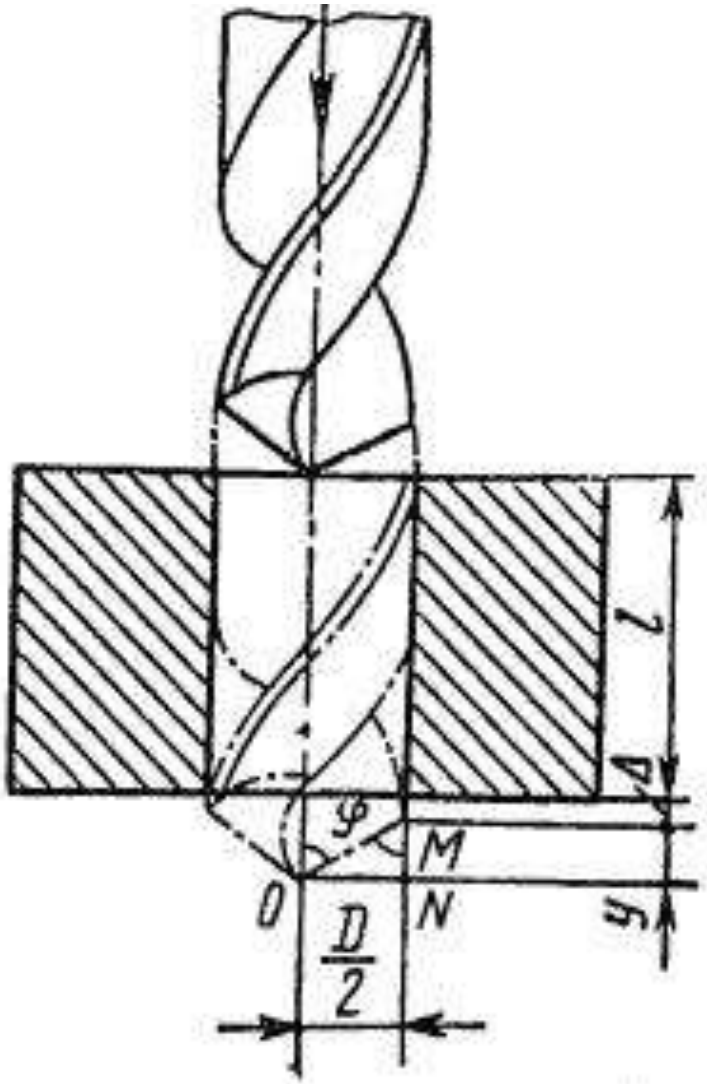

Рисунок 2 - Элементы пути, проходимого сверлом при сквозном (на выход) сверлении

Машинное время при сверлении и рассверливании

$$T_M = L/ns = (l+y+\Delta)/ns \text{ мин}$$

где L — полный путь, проходимый сверлом в направлении подачи, в мм;

l — глубина сверления в мм (глубина отверстия);

Δ — величина перебега (1—2 мм);

n — частота вращения сверла в об/мин;

s — подача в мм/об;

y — величина врезания в мм;

$y = D/2\ ctg\varphi$ (из треугольника OMN);

Для обычных сверл одинарной заточки при угле 2φ = 116 - 118°

$$y = 0{,}3/D;$$

Для сверл с двойной заточкой

$$y = 0{,}4/D;$$

при рассверливании $y = t \cdot ctg\varphi$.

2 Силы резания, момент и мощность при сверлении

- В отличие от точения при сверлении участвуют не одна, а три (две главные и одна поперечная) режущие кромки, которые в совокупности определяют силовую нагрузку на сверло. Кроме этого при сверлении имеет место трение ленточек сверла о стенки обработанного отверстия, что оказывает влияние на крутящий момент.
- В процессе резания сверло испытывает сопротивление со стороны обрабатываемого материала. На каждую точку режущей кромки действуют силы сопротивления.

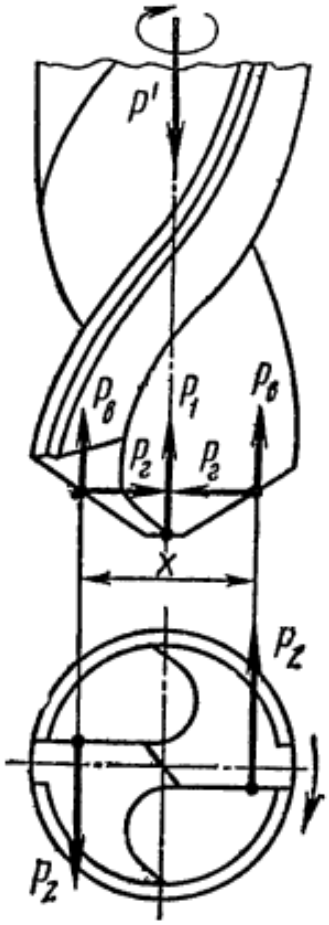

Рисунок 3– Силы, действующие на сверло

На все элементы сверла при резании действуют некоторые силы сопротивления стружкообразованию. Разложим равнодействующую силу сопротивления на каждой режущей кромке на силы в трех взаимно перпендикулярных направлениях: P_z, $P_в$ и $P_г$.

Горизонтальные силы $P_г$, действующие на обеих режущих кромках, можно считать взаимно уравновешенными.

Силы $P_в$, направленные вверх, препятствуют проникновению сверла в глубину заготовки. В этом же направлении действует и сила P_1 на поперечной кромке. Кроме того, продвижению сверла препятствуют силы трения на ленточках сверла (в результате трения об обработанную поверхность отверстия) и силы трения от сходящей стружки $P_т$.

Для проникновения сверла в обрабатываемую заготовку к сверлу от станка должна быть приложена такая сила P', которая могла бы преодолеть сумму сил сопротивления, действующих вдоль оси сверла:

$$P' \geq 2(2P_в + P_1 + P_т).$$

Суммарная сила от указанных сил сопротивления в осевом направлении сверла называется *осевой силой P (или усилием подачи).*

Силы сопротивления проникновению сверла $P_в$, возникающие на режущих кромках, составляют около 40% общего сопротивления (или силы *P*); силы сопротивления, возникающие на поперечной кромке (P_1), составляют 57% и силы от трения $P_т$ — около 3%.

Силы, препятствующие продвижению сверла в материал, преодолеваются механизмом подачи сверлильного станка, который и рассчитывается по максимальной осевой силе P.

При эксплуатации станка с заданными условиями сверления необходимо, чтобы сумма сил сопротивления, действующих вдоль оси сверла, или осевая сила P, была меньше или, в крайнем случае, равна наибольшей силе Pmax, допускаемой механизмом подачи станка (во избежание поломки слабого звена механизма подачи), т. е.

$$P \leq P_{max}$$

Сила P_z создает момент сопротивления

$$M_{ср} = P_z \cdot x.$$

Суммарный момент от сил сопротивления резанию складывается из:

- момента от сил P_z,
- момента от сил скобления и трения на поперечной кромке $M_{п.к}$,
- момента от сил трения на ленточках $M_л$,
- момента от сил трения стружки о сверло и обработанную поверхность $M_с$, т, е.

$$\mathbf{M = M_{с.р} + M_{п.к.} + M_л + M_с.}$$

Измерения показывают, что:

- 80% общего момента сопротивления резанию приходится на долю режущих кромок,
- 8% — на поперечную кромку ,
- 12% — на трение стружки о сверло и стенки отверстия и сверла своими ленточками об обработанную поверхность ($M_л + M_с$).

Для осуществления процесса резания необходимо, чтобы

$$\mathbf{M_{кр} \geq M}$$

Вывод:

- Для осуществления процесса резания к инструменту должны быть приложены сила подачи Р, превосходящая силы сопротивления материала осевому перемещению сверла, и крутящий момент Мкр, необходимый для преодоления момента сопротивления М и для обеспечения главного вращательного движения шпинделя и сверла.

Зная момент сопротивления ***M***, можно определить эффективную мощность $N_э$ затрачиваемую на резание при сверлении.

Мощность, затрачиваемая на резание, будет складываться из мощности, затрачиваемой на вращение, и мощности, затрачиваемой на движение подачи, т. е.

$$N_{рез} = N_{вр} + N_{под}$$

Мощность, затрачиваемая на вращение,

$$N_{вр} = M \cdot n / 975000 \text{ кВт},$$

где M — момент от сил сопротивления резанию в кгс-мм;

n — частота вращения сверла в об/мин.

Мощность, затрачиваемая на подачу сверла,

$$N_{под} = Psn / 60 \cdot 1000 \cdot 102 \text{ кВт}$$

где P — осевая сила в кгс.

Учитывая, что второе слагаемое существенно меньше первого, окончательно имеем:

$$N_{рез} = N_{вр} = M \cdot n / 975000 \text{ кВт}$$

$$N_{дв} = N_{рез} / 1{,}3\eta_{ст}$$

где $\eta_{ст}$ *– к.п.д. станка*

3 Влияние различных факторов на осевую силу и момент

Определение силы P_0 и момента $M_{кр}$ производится по эмпирическим формулам, полученным экспериментальным путём.

Для сверл из инструментальных сталей при обработке стальных и чугунных деталей они имеют следующий вид:

$$P = C_p D^{z_p} s^{y_p} K_p \text{ кгс};$$

$$M = C_м D^{z_м} s^{y_м} K_м \text{ кгс·мм};$$

где $C_р$ и $C_м$ — коэффициенты, характеризующие материал и условия его обработки;

D —диаметр сверла в мм;

s — подача в мм/об;

$z_р$; $z_м$; $y_м$; $y_р$— показатели степеней;

$K_р$ и $K_м$ — общие поправочные коэффициенты на измененные условия обработки.

На возникающие при сверлении осевую силу и суммарный момент сопротивления резанию влияют следующие *основные факторы*:

1) обрабатываемый металл;
2) диаметр сверла и подача;
3) геометрические элементы сверла;
4) смазочно-охлаждающие жидкости;
5) глубина сверления;
6) износ сверла.

Влияние свойств обрабатываемого материала на осевую силу и крутящий момент

- Чем выше предел прочности $\sigma_в$ и твердость ***HB*** материала, тем больше его сопротивление резанию, тем выше значения ***P*** и ***Мкр***.
- Для сверл из быстрорежущей стали получены экспериментально следующие зависимости:
- $P = C_1\sigma_в^{0,75}$
  $M = C_2\sigma_в^{0,75}$; - для стали;
- $P = C_3HB^{1,05}$;
  $M = C_4HB^{0,6}$. - для чугуна.
- где: C_p и $C_м$ – коэффициенты, зависящие от условий резания.

Влияние диаметра сверла и подачи на осевую силу и крутящий момент

- Увеличение подачи и диаметра сверла ведет к росту площади срезаемого слоя и объёму снимаемого материала, что вызывает повышение осевой силы и крутящего момента.
- Большее влияние на величины *P* и *Мкр* оказывает диаметр, чем подача, т.к. диаметр при сверлении определяет глубину резания *(t=D/2).* При этом если подача примерно одинаково влияет как на осевую силу, так и на крутящий момент, то диаметр больше влияет на величину *Мкр*, чем на *P*. Это объясняется тем, что при увеличении диаметра *D* увеличивается не только сила *Pz*, но и плечо, на котором действует данная сила.

Влияние глубины сверления на осевую силу и крутящий момент

- При увеличении длины отверстия *l отв.* возрастают силы трения (силы *Ртр* и *Pztp)*. Следовательно с ростом длины отверстия осевая сила и крутящий момент увеличиваются. Большее влияние величина *lотв* оказывает на крутящий момент *Мкр*, чем на силу *Р*, т.к. доля момента от сил *Pztp* составляет в общей величине M_{Pztp} 7-12%, а доля сил *Ртр* в осевой силе всего 3%.

Влияние **геометрических элементов сверла на осевую силу Р и крутящий момент М**

Угол наклона винтовой канавки ω влияет на параметры Р и *М* постольку, поскольку он влияет на передний угол сверла γ.

Чем больше угол ω, тем больше передний угол в каждой точке режущей кромки сверла, тем меньше деформация срезаемого слоя, а следовательно, меньше осевая сила Р и момент от сил сопротивления *М.*

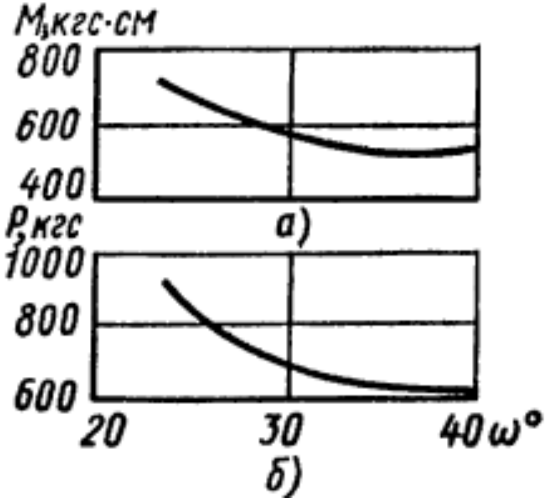

Рисунок 4- Влияние наклона винтовой канавки ω сверла на момент (а) и осевую силу (б)

При уменьшении *угла при вершине сверла 2φ* увеличиваются горизонтальные силы $P_г$ и уменьшаются вертикальные силы $P_в$, что и приводит к уменьшению осевой силы *P;* при увеличении же угла 2φ при вершине сверла увеличивается и осевая сила *P*.

Увеличение или уменьшение силы P_z приводит к соответствующему увеличению или уменьшению момента от сил сопротивления резанию.

При увеличении угла 2φ осевая сила P увеличивается, а момент от сил сопротивления резанию M уменьшается.

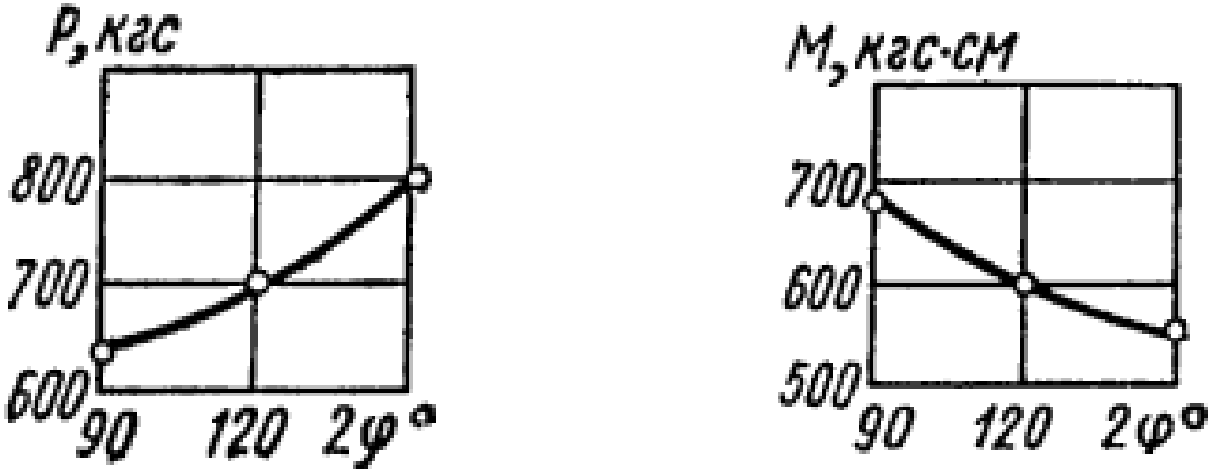

Рисунок 5– Влияние угла при вершине сверла 2φ на осевую силу и момент

Чем больше *длина поперечной кромки*, тем большим будет момент от сил сопротивления резанию и особенно осевая сила. Для уменьшения *P* и *M* подтачивают перемычку, благодаря чему уменьшается как длина поперечной кромки, так и угол резания в точках режущей кромки, близко расположенных к оси сверла; осевая сила *P* при такой подточке уменьшается на 30—35% (по сравнению со сверлом, не имеющим подточки).

У сверл со срезанной поперечной кромкой углы резания еще более благоприятны; такая заточка способствует снижению силы *P* до *4* раз и повышению стойкости сверла.

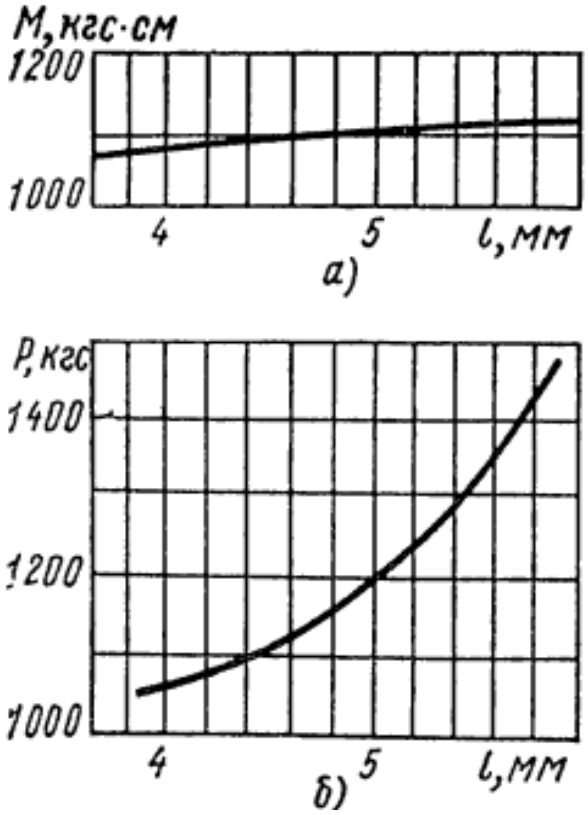

Рисунок 6 –Влияние длины поперечной кромки на на момент (а) и осевую силу (б)

Влияние охлаждающей жидкости на осевую силу и крутящий момент

- Подача охлаждающей жидкости в зону резания облегчает отвод стружки, уменьшает работу трения и замедляет износ сверла. Она способствует снижению осевой силы ***P*** и момента ***Мкр*** до 25% при обработке стальных деталей и до 15% — при обработке чугунных и на 30—40% при обработке алюминиевых сплавов.

Влияние износа сверла на осевую силу и крутящий момент

Сверло в процессе резания изнашивается.
В общем случае сверла из быстрорежущих сталей изнашиваются по задней поверхности, по передней поверхности, по ленточкам и по уголкам (в месте перехода от режущих кромок к ленточкам).

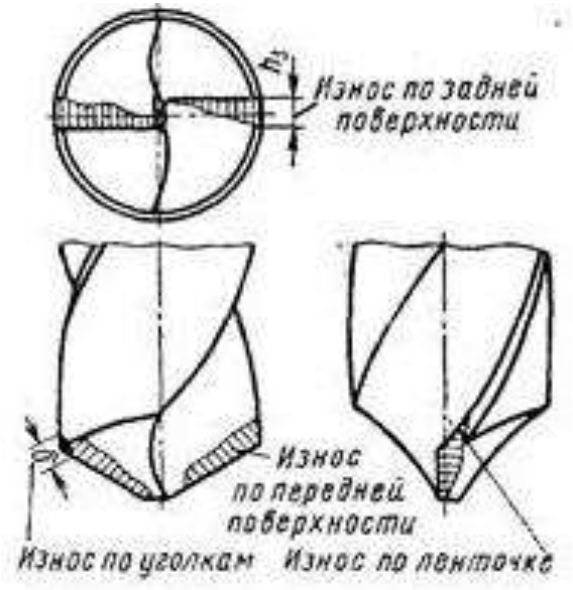

Рисунок – Износ сверла из быстрорежущей стали

- В случае износа ленточки момент от сил сопротивления резанию резко возрастает, а осевая сила почти не изменяется. Объясняется это тем, что дополнительная сила трения,вызванная износом, будет действовать на плече, равном радиусу сверла, что в большей степени скажется на моменте от сил сопротивления резанию *M* и в меньшей степени — на осевой силе *P.*

•В случае износа поперечной кромки более резко увеличится *P* и меньше *M,* так как такой износ образует еще более тупой, закругленный угол у вершины сверла, что будет препятствовать внедрению сверла в обрабатываемый металл. Незначительное же увеличение момента *M* в этом случае объясняется малым плечом, на котором действуют силы, так как длина поперечной кромки по отношению к диаметру сверла относительно невелика.

В случае износа уголка и задней поверхности происходит увеличение осевой силы *P* и момента *M.*

- При обработке сталей за лимитирующий износ принимается износ по задней поверхности. Износ по задней поверхности происходит неравномерно: больше на периферии сверла и меньше в центре. Это объясняется тем, что на периферии сверла скорость резания наибольшая, что вызывает наибольшее тепловыделение и наибольшую скорость относительного скольжения точек сверла по отношению к поверхности резания.
- С увеличением износа сверла по задней поверхности h_3 P и $Мкр$ увеличиваются. Затупленное сверло по отношению к острому повышает P и M на 10—16%.

4 Влияние различных факторов на скорость резания

На скорость резания при сверлении влияют следующие ***основные факторы***:

- стойкость режущего инструмента,
- физико-механические свойства обрабатываемого металла,
- материал режущей части сверла,
- диаметр сверла,
- подача,
- глубина сверления,
- форма заточки сверла,
- смазочно-охлаждающие жидкости.

Стойкость режущего инструмента.

Чем больше скорость резания, тем больше тепловыделение, интенсивнее износ, скорее затупится сверло, меньшую стойкость оно будет иметь. Скорость резания зависит от стойкости сверла:

$$v = A/T^m$$

где m - показатель относительной стойкости при работе сверлами.

При работе *сверлами из быстрорежущей стали*:

- *m* = 0,2 при обработке сталей;
- *m* = 0,125 при обработке чугунов.

При работе сверлами с пластинками из твердых сплавов (ВК8)

- *m* = 0,2 при резании чугунов.

Для сверл D = 5 ÷ 60 мм из быстрорежущих сталей:

- T = 15 ÷ 110 мин при обработке стали ,
- T = 20 ÷ 170 мин при обработке чугуна.

Для сверл, оснащенных твердым сплавом ВК8

- T — 40 ÷ 80 мин при обработке серого чугуна.

Физико-механические свойства обрабатываемого металла.

Чем выше механические свойства обрабатываемого металла, тем меньше скорость резания, допускаемая сверлом (при одной и той же стойкости). В зависимости от предела прочности стали при растяжении скорость резания, допускаемая сверлами из быстрорежущей стали (при одной и той же стойкости)

$$\upsilon = \frac{C_1}{\sigma_B^{\chi}}.$$

При сверлении заготовок *из автоматных сталей* показатель степени x = 1,05;

При сверлении *углеродистых сталей:*

- с $\sigma_в$ < 55 кгс/мм^2 величина x = - 0,9;
- при $\sigma_в \geq 55$ кгс/мм^2 величина x = 0,9;

При сверлении хромистых, никелевых, хромоникелевых, хромомолибденовых, инструментальных быстрорежущих и других легированных незакаленных сталей x = 0,9.

Для сверла, оснащенного твердым сплавом ВК8, при обработке серого чугуна скорость резания зависит от твердости чугуна:

$$\upsilon = \frac{C_2}{HB^{0,7}}.$$

Материал режущей части сверла.

Сверла из инструментальных углеродистых сталей допускают скорости резания в 2 раза меньшие, чем сверла из быстрорежущих сталей Р18 и Р9; сверла с пластинками из твердых сплавов — в 2—3 раза большие. Сверла из легированной стали 9ХС допускают меньшую скорость резания, чем сверла из стали Р18 (коэффициент уменьшения 0,6).

Диаметр сверла.

С увеличением диаметра сверла (при прочих одинаковых условиях) скорость резания, допускаемая сверлом, повышается.

Это объясняется тем, что при увеличении диаметра сверла, несмотря на увеличение площади поперечного сечения среза и увеличение работы, затрачиваемой на резание, отвод теплоты от поверхностей сверла в его тело и в заготовку более интенсивен, что снижает тепловую напряженность на поверхностях трения сверла и повышает его стойкость.

Подача.

С увеличением подачи увеличивается термодинамическая нагруженность сверла, что снижает его стойкость (или скорость резания при одинаковой стойкости).

Глубина сверления.

С увеличением глубины сверления условия работы сверла становятся более тяжелыми; это приводит к большему нагреву сверла и к снижению его стойкости (в большей степени для сверл меньших диаметров). Поэтому при сверлении на глубину более *3D* скорость резания необходимо снижать, что учитывается поправочным коэффициентом K_{lv} :

Глубина отверстия до	3D	*4D*	5*D*	6*D*	8*D* 10D
Коэффициент K_{lv} ……	1,0	0,85	0,75	0,7	0,6

- **Форма заточки.** Формы заточек сверл выбирают в зависимости от свойств обрабатываемых материалов и диаметра сверла.
- Для повышения стойкости сверла и производительности обработки производят двойную заточку сверла под углами $2\varphi = 116...118°$ и $2\varphi_0 = 70...90°$.
- Двойная заточка под углом $2\varphi_0 = 70°$ позволяет повысить скорость резания в среднем на 15—20% при сверлении стали (по сравнению с одинарной заточкой) и на 30% при сверлении чугуна; стойкость сверл (при одной и той же скорости резания) повышается в 2—3,5 раза.

Повышение скорости резания, допускаемой сверлом, объясняется тем, что режущая кромка становится длиннее, стружка у кромки, образованной дополнительной заточкой, будет тоньше, а уголок (в место перехода от режущих кромок к ленточкам), являющийся наиболее слабым местом сверла,— более массивным. Это повышает прочность уголка и снижает термодинамическую нагрузку на единицу длины режущей кромки.

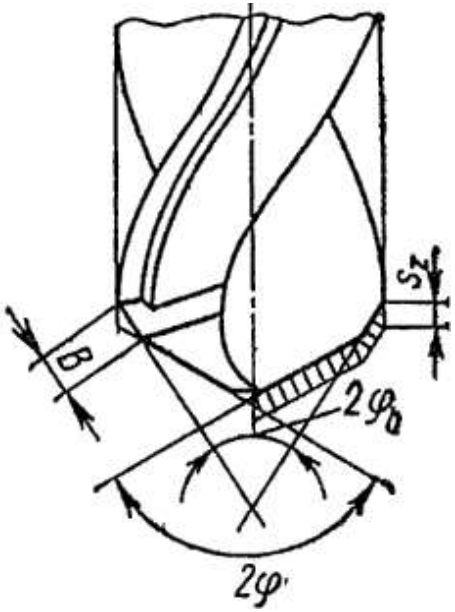

Рисунок 7- Двойная заточка сверла

- Подточка поперечной кромки (рис.8 в) и ленточки сверла (рис. 8г) облегчает процесс сверления отверстий. Подточка поперечной кромки снижает осевую силу, а подточка ленточки уменьшает трение ленточек о стенки отверстия и повышает стойкость сверл.
- При подточке длина поперечной кромки уменьшается до 50 %. Обычно производится подточка сверл диаметром более 12 мм, а также после каждой переточки сверла.

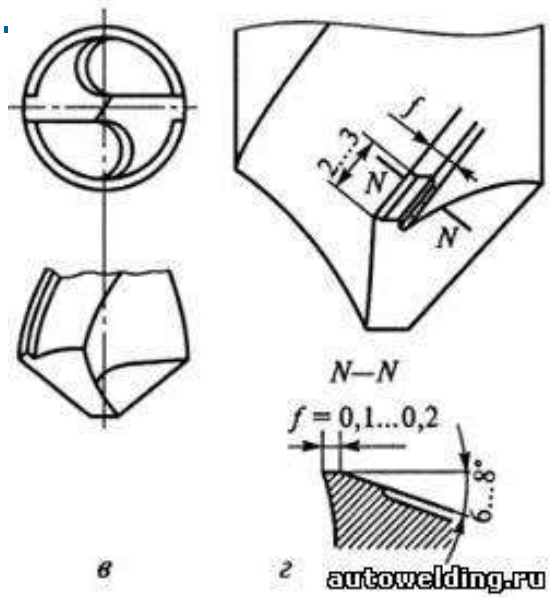

Рисунок 8- *в - подточка поперечного лезвия и ленточки; г - подточка ленточки: f - ширина ленточки*

Смазочно-охлаждающие жидкости.

При сверлении применяются *следующие жидкости*:

- при обработке сталей — эмульсии и компаундированные масла (для легированных сталей);
- при обработке ковкого чугуна — эмульсии;
- при обработке серого чугуна — керосин (чаще всухую);
- при обработке алюминия — эмульсия, керосин (чаще всухую);
- при обработке бронзы — эмульсия (чаще всухую).

Особенно эффективен подвод жидкости в зону резания под давлением 15 кгс/мм2. При такой интенсивной подаче жидкости стружка получается дробленой и полностью вымывается из отверстия. Значительное снижение температуры резания при этом приводит к повышению стойкости сверл из быстрорежущей стали Р9 до 10 раз, что обеспечивает возможность соответствующего повышения элементов режима резания и снижения машинного времени в 2 раза.

Контрольные вопросы:

1. Элементы режима резания и среза при сверлении;
2. Силы действующие на сверло, крутящий момент;
3. Влияние различных факторов на осевую силу и момент;
4. Влияние различных факторов на скорость резания;
5. *Влияние* геометрических элементов сверла на осевую силу и крутящий момент
6. Влияние свойств обрабатываемого материала на осевую силу и крутящий момент

Литература:

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. спец. вузов. – М.: Высшая школа. 2019 – 304 с.

2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 2010 – 344 с.

3. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов. - М.: Машгиз, 2010 – 366с.

4. Формообразующие инструменты в машиностроении: учебное пособие / А. Г. Схиртладзе [и др.]. - М. : Новое знание, 2017. - 556 с. : ил. - (Техническое образование).

5. Режущий инструмент: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / Д. В. Кожевников [и др.] ; под ред. С. В. Кирсанова. - 3-е изд. - М.: Машиностроение, 2015. - 526 с.