

ствуют на острозаточенное лезвие зуба протяжки, когда контактная площадка задней поверхности зуба и упруговосстанавливаемой обработанной поверхности незначительная. По мере затупления зуба по задней поверхности давление сразу уменьшается, а при износе  $h_3 = 0,3 \dots 0,5$  мм оно катастрофически возрастает, что приводит к сколам и выкрошиванию частичек твердого сплава зуба протяжки. Кроме того, с увеличением контактной площадки наблюдается увеличение сил молекулярного сцепления обрабатываемого материала и материала инструмента, в результате чего происходит молекулярное схватывание и проникновение части одного материала в другой. При этом отсутствует действие внешнеактивной среды, создающей окисные пленки. Особенно это наблюдается при обработке жаропрочных материалов, в состав которых входит  $C_r$  и другие элементы, способствующие не только разрушению окисных пленок и увеличению диффузии, но и увеличению адгезии, в результате чего повышается коэффициент трения в контактной зоне инструмент — обрабатываемый материал.

Из приведенных выше данных следует, что резание труднообрабатываемых материалов таким процессом, как протягивание, затруднено. К тому же протягивание имеет отличительные особенности по сравнению с другими методами лезвийной обработки (точение, фрезерование и др.), а поэтому данные по другим методам непосредственно при протягивании нельзя использовать. В связи с этим требуется проведение специальных опытов.

УДК 621.951.012:531.3

С.И.Миткевич, канд. техн. наук (БПИ)

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ИНСТРУМЕНТА С КОНИЧЕСКОЙ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТЬЮ И ВРЕМЕНИ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ПОСТОЯННОМ КРУТЯЩЕМ МОМЕНТЕ НА ШПИНДЕЛЕ СТАНКА

В настоящее время на машиностроительных предприятиях в производство внедряется новый многолезвийный инструмент для обработки круглых сквозных отверстий [1, 2], названный силовой разверткой, а процесс обработки этим инструментом соответственно — силовым развертыванием. Основной отличительной

особенностью силовой развертки от обычных инструментов для обработки отверстий (зенкеров и разверток) является то, что ее режущая часть выполнена увеличенной длины (до 150 мм) и с весьма малым углом уклона  $\varphi$  ее конуса (до трех градусов). Инструмент такой конструкции предназначен для обработки относительно коротких отверстий, длина которых меньше длины его режущей части  $l_p$ . При указанном соотношении длины обрабатываемого отверстия и параметров силовой развертки процесс срезания основной части припуска ею в отличие от зенкеров и разверток осуществляется одновременно на всей длине отверстия. Следовательно, суммарная ширина среза при силовом развертывании пропорциональна длине обрабатываемого отверстия и в десятки раз больше ширины среза при работе обычных инструментов. Данное обстоятельство определяет высокую производительность нового процесса за счет резкого сокращения основного времени обработки.

Вместе с тем в процессе резания с большой шириной среза, как показали расчеты и экспериментальные исследования [3], возникает большая окружная сила резания, действие которой на систему СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) характеризуется крутящим моментом на шпинделе станка. Существующее металлорежущее оборудование сверлильной группы рассчитано на крутящие моменты при резании, меньшие, чем те, которые возникают при силовом развертывании. Поэтому этим методом на указанном оборудовании можно обрабатывать отверстия сравнительно небольших размеров или, в противном случае, возможности нового процесса по производительности будут использованы лишь частично. Следует также указать, что при меньших значениях крутящего момента и их разбросе меньше деформация и амплитуда колебаний системы СПИД, а следовательно, – выше качество обработки и долговечность инструмента. В связи с этим одной из задач оптимизации силового развертывания является снижение максимального значения крутящего момента и его стабилизация при резании.

В данной работе рассмотрен один из методов снижения максимальной величины крутящего момента  $M_{кр}$  за счет обеспечения постоянного его значения на протяжении всего периода обработки отверстия при одновременном повышении производительности труда. Указанный метод основан на закономерности, при которой с изменением толщины среза сила резания также изменяется. Это положение отражено в формуле зависимости

окружной (тангенциальной) силы резания от толщины  $a$  и ширины среза  $b$  при обработке металлов [4]:

$$P_{\text{окр}} = C \cdot a^m \cdot b^u, \quad (1)$$

где  $C$  – коэффициент, учитывающий различные условия обработки, определяется как произведение ряда коэффициентов, взятых из справочной литературы.

Показатель степени  $m$  при толщине среза  $a$  в приведенной формуле меньше единицы и, например, при силовом разворачивании чугуна СЧ 18–36 равен 0,68, а стали 45 – 0,82. Показатель степени  $u$  при ширине среза равен единице, так как увеличение этого параметра вызывает прямо пропорциональное возрастание сил резания [3].

Изменение толщины среза при работе инструмента с конической режущей частью достигается соответствующим изменением скорости поступательного движения его вдоль оси вращения (подачи), определяемой в мм/об по формуле:

$$V_{\text{п}} = \frac{a \cdot z}{\sin \varphi}, \quad (2)$$

где  $z$  – число зубьев инструмента.

Рассмотрим подробнее метод снижения крутящего момента при силовом разворачивании. При постоянной подаче каждым участком конической режущей части инструмента снимается постоянная толщина среза, однако нагружены эти участки разным по величине крутящим моментом. По мере обработки отверстия величина  $M_{\text{кр}}$  непрерывно увеличивается, достигая своего максимального значения на участке режущей части с наибольшим диаметром. Уменьшая скорость подачи по определенному закону и соответственно – толщину слоя металла, снимаемого каждым отдельным участком режущей части от меньшего его диаметра к большему, можно получить постоянный крутящий момент на шпинделе. Таким образом,  $M_{\text{кр}}$  относительно прежней его величины (при  $V_{\text{п}} = \text{const}$ ) в области меньшего диаметра конуса режущей части инструмента будет увеличиваться, а ближе к максимальному диаметру – уменьшаться. В итоге за счет перераспределения нагрузки на режущей части максимальный крутящий момент при обработке будет меньше.

Весь цикл обработки отверстия с постоянным  $M_{\text{кр}}$  по скорости подачи инструмента можно разделить на четыре этапа (рис. 1). Перед началом обработки инструмент из исходного положения быстро подводится к детали (ускоренный подвод). Затем на

этапе 1 обработки скорость его перемещения (подача) снижается до максимально допустимой по условиям резания (прочности и износостойкости лезвий зубьев) величины. С этой постоянной подачей  $V_{п1}$  происходит врезание инструмента в отверстие на длине  $S_1$ , которая определяется по заданному крутящему моменту и максимально допустимой толщине среза. Целесообразность начала работы инструмента с постоянной максимальной подачей на некоторой длине отверстия вызвана тем,

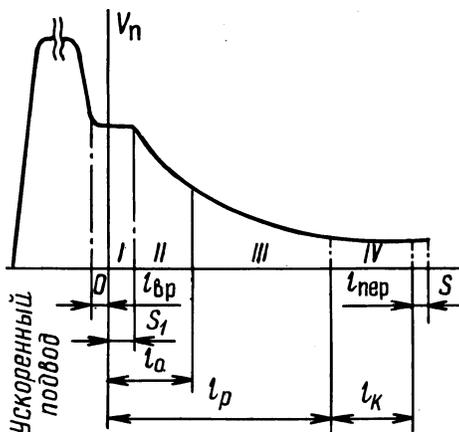


Рис. 1. Изменение скорости подачи инструмента от пути его осевого перемещения за период обработки отверстия: I и II – при врезании режущей части; III – при установившемся процессе резания на всей длине обрабатываемого отверстия; IV – при окончательной обработке отверстия калибрующей частью.

что в начальный момент обработки ширина среза начинает возрастать от нуля и для достижения заданного крутящего момента на шпинделе потребовалось бы обеспечить очень большую скорость подачи, что практически неосуществимо, и, кроме того, это приведет к выкрошиванию режущих лезвий инструмента из-за чрезмерно большой нагрузки на них. На этапе II процесса дальнейшего врезания инструмента в отверстие на всю его длину  $l_0$  подача должна уменьшаться от максимального значения так, чтобы достигался постоянный крутящий момент на шпинделе станка, возрастающий при постоянной подаче из-за увеличения суммарной ширины среза и диаметра режущей части инструмента (кривая II на рис. 1). Далее после полного врезания режущей части, то есть при обработке на всей длине отверстия (этап III), подача должна уменьшаться уже по другому закону (см. рис. 1), так как в этом случае суммарная ширина среза остается постоянной, а возрастет будет только радиус инструмента. При включении в работу калибрующей части подача уже должна не уменьшаться, а, наоборот, возрастать, так как на этом этапе IV обработки по мере осевого перемещения

инструмента суммарная ширина среза убывает. Но с целью улучшения качества обработанного отверстия подачу при работе калибрующей части следует оставить постоянной, равной минимальному значению ее в конце третьего этапа.

Установим вначале закон изменения скорости подачи инструмента от его перемещения на этапе II, то есть в период врезания режущей части его в заготовку. Для этого воспользуемся расчетной схемой (рис. 2), на которой приняты следующие

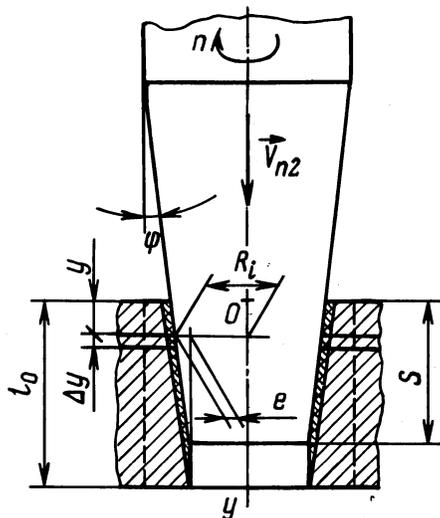


Рис. 2. Схема к определению крутящего момента на шпинделе станка в период врезания инструмента в заготовку.

обозначения:  $l_0$  - длина обрабатываемого отверстия;  $S$  - путь, пройденный инструментом относительно заготовки по оси  $y$  (для этапа врезания инструмента он равен длине его режущей части, участвующей в резании в конкретный момент времени);  $R_i$  - радиус режущей части инструмента в  $i$ -том сечении, отстоящем от верхнего торца заготовки на расстоянии  $y$ ;  $e$  - приращение радиуса режущей части инструмента в  $i$ -том сечении по сравнению с его  $R_{\min}$  и согласно схеме (см. рис. 2):

$$e = (S - y) \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Исходя из принятых обозначений,

$$R_i = R_{\min} + (S - y) \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Разобьем всю заготовку плоскостями, перпендикулярными оси  $y$ , на бесконечно тонкие пластинки. Тогда элементарный крутящий момент на шпинделе станка при резании одной такой пластинки будет равен:

$$\Delta M_{\text{кр}} = \Delta P_{\text{окр}} \cdot R_i \cdot z,$$

где  $P_{\text{окр}}$  – элементарная окружная сила резания на одном зубе инструмента, определяемая по формуле

$$\Delta P_{\text{окр}} = C \cdot a^m \cdot \Delta y.$$

Перейдя к пределу суммы элементарных моментов с учетом значений  $\Delta P_{\text{окр}}$  и  $R_i$  и выразив этот предел определенным интегралом по переменному  $y$  в пределах от 0 до  $S$ , получим

$$\begin{aligned} M_{\text{кр}} &= C \cdot z \cdot a^m \int_0^S (R_{\text{min}} + S \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi y) dy = \\ &= C \cdot z \cdot a^m \left( R_{\text{min}} \cdot S + \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2} S^2 \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Из этого значения крутящего момента, принимая его постоянным, выразим толщину среза  $a$  и, подставив ее значение в уравнение (2), окончательно получим закон изменения скорости подачи, при которой обеспечивается постоянный  $M_{\text{кр}}$  на шпинделе станка в период врезания инструмента в заготовку:

$$V_{\text{п2}} = \frac{M_{\text{кр}}^{\frac{1}{m}} \cdot z}{\left[ C \cdot z \left( R_{\text{min}} \cdot S + \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2} S^2 \right) \right]^{\frac{1}{m}} \cdot \sin \varphi}. \quad (4)$$

Для этого этапа обработки значение пути  $S$  в формуле (4) берется в пределах от  $S_1$  до  $l_0$ . Величина  $S_1$ , при которой достигается требуемый постоянный крутящий момент  $M_{\text{кр}}$ , определяется из уравнения (3), являющегося квадратным:

$$S_1^2 + \frac{2R_{\text{min}}}{\operatorname{tg} \varphi} S_1 - \frac{2M_{\text{кр}}}{C \cdot z \cdot a_{\text{max}}^m \cdot \operatorname{tg} \varphi} = 0,$$

где  $a_{\text{max}}$  – максимально допустимая толщина среза для конкретных условий обработки.

Определяя корни этого уравнения, получим

$$S_1 = - \frac{R_{\text{min}}}{\operatorname{tg} \varphi} + \sqrt{\frac{R_{\text{min}}^2}{\operatorname{tg}^2 \varphi} + \frac{2M_{\text{кр}}}{C \cdot z \cdot a_{\text{max}}^m \cdot \operatorname{tg} \varphi}}. \quad (5)$$

Так как  $S_1$  величина положительная, то в выражении (5) перед квадратным корнем берем знак плюс.

Далее установим закон изменения скорости подачи инструмента, с условием обеспечения постоянного крутящего момента, при установившемся процессе резания на всей длине отверстия, начиная от полного врезания зубьев режущей части в обрабатываемый материал и до момента включения в работу калибрующей части инструмента.  $M_{кр}$  на шпинделе станка для этого этапа обработки (рис. 3) определяется по формуле

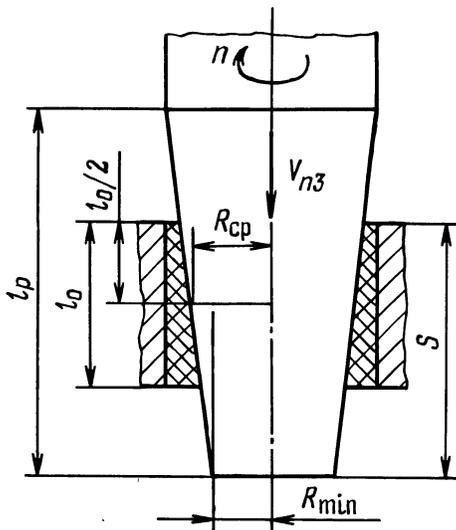


Рис. 3. Схема к определению крутящего момента на шпинделе станка в период установившегося процесса резания на всей длине отверстия.

$$M_{кр} = P_{окр} \cdot R_{ср} \cdot z,$$

где  $R_{ср}$  - средний радиус участка режущей части инструмента, находящегося в контакте с поверхностью отверстия.

Из схемы на рис. 3

$$R_{ср} = R_{min} + \left( S - \frac{l_0}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

тогда с учетом значения  $P_{окр1}$

$$M_{кр} = C \cdot z \cdot a^m \cdot l_0 \left( R_{min} - \frac{l_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi + S \cdot \operatorname{tg} \varphi \right).$$

Выразив значение толщины среза  $a$  из полученного уравнения и подставив его в формулу (2), получим закон изменения скорости подачи на третьем этапе обработки отверстия:

$$V_{пз} = \frac{M_{кр}^{\frac{1}{m}} \cdot z}{\left[ C \cdot z \cdot l_0 \left( R_{min} - \frac{l_0}{2} \operatorname{tg} \varphi + S \cdot \operatorname{tg} \varphi \right) \right]^{\frac{1}{m}} \cdot \sin \varphi}. \quad (6)$$

Для определения основного времени обработки отверстия с изменяющейся по полученным законам подачей инструмента воспользуемся формулой скорости, из которой

$$dt = \frac{dS}{V_{\Pi} \cdot n} \quad (7)$$

где  $n$  - частота вращения шпинделя станка, об/мин.

На первом этапе обработки отверстия при перемещении инструмента на длину  $S_1$  с постоянной подачей основное время в минутах

$$T_1 = \frac{S_1 + l_{\text{вр}}}{V_{\Pi 1} \cdot n}, \quad (8)$$

где  $l_{\text{вр}}$  - величина врезания инструмента.

На следующем этапе обработки при дальнейшем врезании инструмента в заготовку на глубину от  $S_1$  до  $l_0$  с подачей, изменяющейся по закону (4), для определения времени  $T_2$  можно записать:

$$dt = \frac{(C \cdot z \cdot R_{\text{min}})^{\frac{1}{m}} \sin^{\varphi} S^{\frac{1}{m}} \left(1 + \frac{\text{tg } \varphi}{2R_{\text{min}}} \cdot S\right)^{\frac{1}{m}}}{M_{\text{кр}}^{\frac{1}{m}} \cdot z \cdot n} dS. \quad (9)$$

С целью упрощения записей для постоянных величин в этом уравнении введем следующие обозначения:

$$\frac{1}{m} = \alpha, \quad \frac{(C \cdot z \cdot R_{\text{min}})^{\alpha} \sin^{\varphi}}{M_{\text{кр}}^{\alpha} \cdot z \cdot n} = A, \quad \frac{\text{tg } \varphi}{2R_{\text{min}}} = B.$$

Тогда выражение (9) примет вид:

$$dt = A \cdot S^{\alpha} (1 + B \cdot S)^{\alpha} dS. \quad (9, a)$$

Правую часть этого уравнения можно проинтегрировать почленно после разложения в биномиальный ряд множителя  $(1 + B S)^{\alpha}$ , в котором, как показали расчеты,  $B \cdot S < 1$ . При этом ограничимся с достаточной степенью точности первыми пятью членами, так как погрешность расчета по абсолютной величине не превысит для знакопеременного ряда первого отброшенного члена. После подстановки членов ряда в (9, a) запишем:

$$T_2 = A \int_{S_1}^{l_0} \left[ S^{\alpha} + \alpha \cdot B \cdot S^{\alpha+1} + \frac{\alpha(\alpha-1) B^2}{2} S^{\alpha+2} + \right.$$

$$+ \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)B^3}{6} S^{\alpha+3} + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3)B^4}{24} x \times S^{\alpha+4}] dS. \quad (10)$$

Проинтегрировав правую часть этого равенства, получим

$$T_2 = A \left[ \frac{l_0^{\alpha+1} - S^{\alpha+1}}{\alpha+1} + \frac{\alpha \cdot B (l_0^{\alpha+2} - S_1^{\alpha+2})}{\alpha+2} + \frac{\alpha(\alpha-1) \cdot B^2 (l_0^{\alpha+3} - S_1^{\alpha+3})}{2(\alpha+3)} + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2) \cdot B^3 (l_0^{\alpha+4} - S_1^{\alpha+4})}{6(\alpha+4)} + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)(\alpha-3) \cdot B^4 (l_0^{\alpha+5} - S_1^{\alpha+5})}{24(\alpha+5)} \right]. \quad (11)$$

Для определения основного времени на третьем этапе обработки при срезании стружки на всей длине отверстия проинтегрируем в соответствующих пределах зависимость:

$$T_3 = \frac{(C \cdot z \cdot l_0)^\alpha \sin \varphi}{M_{кр}^\alpha \cdot z \cdot n} \int_{l_0}^{l_p} \left( R_{\min} - \frac{l_0}{2} \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi \cdot S \right)^\alpha dS, \quad (12)$$

после чего получим

$$T_3 = \frac{(C \cdot z \cdot l_0)^\alpha \cos \varphi}{M_{кр}^\alpha \cdot z \cdot n (\alpha+1)} \left\{ \left[ R_{\min} - \operatorname{tg} \varphi \left( \frac{l_0}{2} - l_p \right) \right]^{\alpha+1} - \left( R_{\min} + \frac{l_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \varphi \right)^{\alpha+1} \right\}. \quad (13)$$

Время обработки отверстия калибрующей частью  $T_4$  определяется по формуле

$$T_4 = \frac{l_0 + l_{\text{пер}}}{V_{\text{п min}} n}, \quad (14)$$

где  $l_{\text{пер}}$  - величина перебега инструмента;  $V_{\text{п min}}$  - мини-

мальная скорость подачи инструмента, которую можно определить из формулы (6), приняв  $S = 1$ .

Таким образом, основное время обработки отверстия, включая все этапы, равно:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4.$$

При обработке отверстий с изменяющейся по полученным законам скоростью подачи инструмента, кроме уменьшения максимального крутящего момента, улучшается качество обработанных отверстий, снижается основное время обработки, повышается стойкость инструмента и более равномерный износ зубьев по всей их длине, что объясняется уменьшением толщины среза, а следовательно, силовой и тепловой нагрузок на участках режущей части с большими диаметрами, где скорость резания возрастает.

### Л и т е р а т у р а

1. А. с. 371037 (СССР). Режущий инструмент / Ящерицын П.И., Миткевич С.И., Комаров В.Н. – Оpubл. в Б.И., 1973, № 12. 2. Ящерицын П.И., Комаров В.Н., Миткевич С.И. Силовое развертывание отверстий. – Промышленность Белоруссии, 1972, № 8. 3. Эффективное применение силового развертывания в машиностроении: Обзорная инф. / П.И.Ящерицын, В.Н.Комаров, С.И.Миткевич, Л.С.Овчинников. – Мн., 1979. 4. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. – М., 1976.

УДК 621.951.7

С.И.Миткевич, канд. техн. наук (БПИ)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ РАЗВЕРТОК ПО КРИТЕРИЮ РАЗМЕЩЕНИЯ И ВЫВОДА СТРУЖКИ ИЗ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ОТВЕРСТИЯ

Особенностью работы силовых разверток является снятие стружки большого объема одновременно на всей длине обрабатываемого отверстия. Поэтому при проектировании этих инструментов особое внимание нужно уделять вопросу размещения и вывода стружки из обрабатываемого отверстия, что в некоторых случаях определяет вообще работоспособность силовых разверток.