

Ф.В. Новиков, докт. техн. наук, Харьков, Украина,
И.Е. Иванов, Мариуполь, Украина

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ

При рассверливании отверстий неправильной цилиндрической формы, имеющих место, например, в горловинах баллонов, возникают значительные погрешности обрабатываемых отверстий, которые снижают качество нарезаемой в них резьбы. В работах [1, 2] обоснованы условия повышения точности обработки отверстий, показано существенное влияние отношения $\sigma/K_{рез}$, где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{рез} = P_z/P_y$; P_z, P_y – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, Н. Вместе с тем, в научно-технической литературе отсутствуют решения об определении отношения $\sigma/K_{рез}$, при сверлении. Поэтому целью работы является аналитическое описание и анализ параметров силовой напряженности процесса резания при сверлении.

В работах [3, 4] показано, что применительно к процессу точения параметры σ и $K_{рез}$ определяются аналитическими зависимостями:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right), \quad (1)$$

$$K_{рез} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma), \quad (2)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; γ – передний угол инструмента, град; ψ – условный угол трения обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента ($\operatorname{tg}\psi = f$ – коэффициент трения).

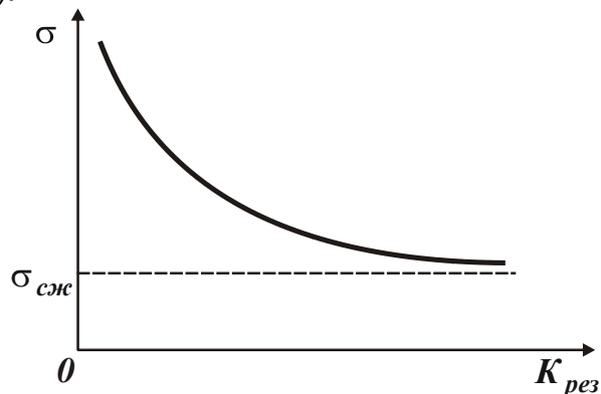


Рис. 1. Зависимость условного напряжения резания σ от коэффициента резания $K_{рез}$.

Как следует из зависимости (1), условное напряжение резания σ тем меньше, чем больше коэффициент резания $K_{рез}$, рис. 1. Увеличить

коэффициент резания $K_{рез}$, согласно зависимости (2), можно увеличением переднего угла инструмента γ и уменьшением условного коэффициента трения ψ обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента.

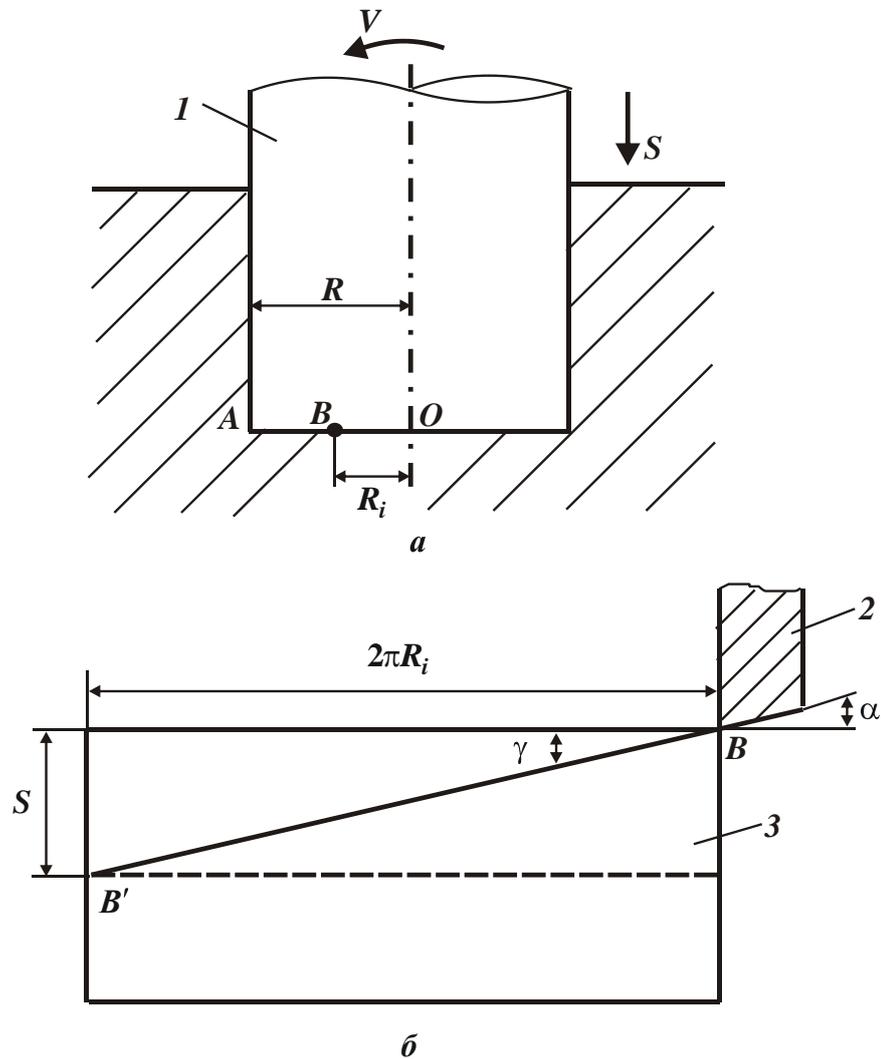


Рис. 2. Упрощенная расчетная схема процесса сверления (а) и развертка траектории перемещения точки, расположенной на режущем лезвии сверла (б): 1 – сверло; 2 – лезвие сверла; 3 – обрабатываемый материал.

Применим зависимости (1) и (2) для расчета параметров σ и $K_{рез}$ при сверлении отверстия. Для упрощения расчетов и получения принципиальных решений примем, что угол сверла в плане $2\varphi=180^\circ$, а передняя поверхность режущего лезвия сверла имеет вид, показанный на рис. 2, т.е. передний угол лезвия сверла равен нулю. За время одного вращения сверло перемещается в осевом направлении на величину подачи S . При этом каждая точка режущего лезвия проходит разную длину пути: точка A – наибольшую, а точка O – наименьшую. На рис. 2,б показана развертка траектории перемещения (по винтовой линии) точки B , расположенной на режущем лезвии сверла, в точку B' за одно вращение сверла. В результате такого перемещения точки B рабочий передний угол инструмента увеличится от нуля до величины γ , определяемой следующей зависимостью:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{S}{2\pi \cdot R_i}, \quad (3)$$

где R_i – текущий радиус сверла, м.

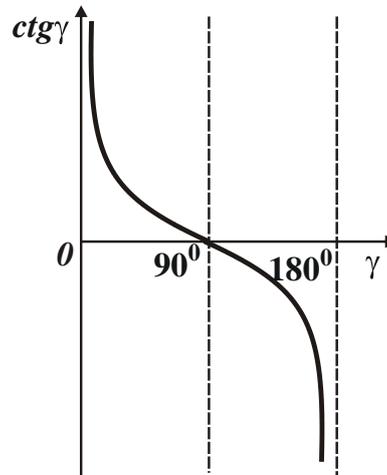


Рис. 3. График изменения функции $\operatorname{ctg}\gamma$.

Как следует из зависимости (3), передний угол сверла γ тем больше, чем больше подача S и меньше текущий радиус сверла R_i . Очевидно, для точки А режущего лезвия сверла радиусом R передний угол примет наименьшее значение. Для точки О режущего лезвия сверла передний угол будет наименьшим: $\gamma=90^\circ$, т.к. $R_i=0$. В этом случае, как будет показано далее, процесс резания неосуществим, возможен лишь процесс упруго-пластического деформирования обрабатываемого металла. Этим показано, что при сверлении рабочий передний угол инструмента зависит от подачи и радиуса сверла. Разрешим зависимость (3) относительно R_i :

$$R_i = \frac{S}{2\pi} \cdot \operatorname{ctg}\gamma. \quad (4)$$

Таблица 1

Значения функции $\operatorname{ctg}\gamma$

| | | | | | |
|----------------------------|------|------|------|------|----|
| γ , град | 10 | 30 | 50 | 70 | 90 |
| $\operatorname{ctg}\gamma$ | 5,67 | 1,73 | 0,84 | 0,36 | 0 |

На рис. 3 показан график изменения функции $\operatorname{ctg}\gamma$, а в табл. 1 приведены ее численные значения. Как видно, с увеличением угла γ от 0 до 90° функция $\operatorname{ctg}\gamma$ уменьшается от бесконечности до нуля. Соответственно по такому закону уменьшается и текущий радиус R_i . Необходимо отметить, что, исходя из рис. 2,б, угол γ не должен превышать задний угол режущего лезвия сверла α , т.к. в противном случае процесс резания будет неосуществим. Следовательно, задний угол лезвия сверла α должен определяться из условия:

$$\operatorname{tg}\alpha \geq \frac{S}{4\pi \cdot R_i}. \quad (5)$$

Из условия (5) следует, что задний угол лезвия сверла α должен быть переменным по длине лезвия сверла. Наименьшее значение угол α должен принимать в точке А, а наибольшее значение – $\alpha = 90^\circ$ в точке О.

Располагая зависимостью (3), можно подойти к определению параметров силовой напряженности процесса сверления σ и $K_{рез}$, описываемых зависимостями (1) и (2). Для этого преобразуем зависимость (2) с помощью известного тригонометрического соотношения:

$$K_{рез} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma) = \frac{\left(1 + f \cdot \frac{S}{2\pi \cdot R_i}\right)}{\left(f - \frac{S}{2\pi \cdot R_i}\right)}. \quad (6)$$

Как видно, коэффициент резания $K_{рез}$ в значительной степени зависит от текущего радиуса R_i . Чем меньше R_i , тем больше $K_{рез}$ и соответственно меньше условное напряжение резания σ , определяемое зависимостью 1). Следовательно, ниже силовая напряженность процесса резания при сверлении.

С физической точки зрения коэффициент резания $K_{рез}$ является положительной величиной. Поэтому процесс стружкообразования при резании может быть осуществлен при условии $\psi \geq \gamma$. При невыполнении данного условия будет иметь место упруго-пластическое деформирование обрабатываемого металла без образования стружки. Проведем теоретический анализ данного условия ($\psi = \gamma$). Исходя из зависимости (6), в этом случае коэффициент резания $K_{рез}$ принимает значение $K_{рез} \rightarrow \infty$ и выполняется

условие: $f = \frac{S}{2\pi \cdot R_i}$. Из данного условия можно определить предельное

значение текущего радиуса R_i , при котором осуществим процесс стружкообразования при резании:

$$R_i = \frac{S}{2\pi \cdot f}. \quad (7)$$

На рис. 4 приведены расчетные значения R_i в зависимости от коэффициента трения f обрабатываемого металла с передней поверхностью режущего лезвия сверла и подачи S . Как видно, эти значения относительно небольшие, не превышают 1 мм. Следовательно, процесс стружкообразования неосуществим лишь на небольшом участке длины лезвия, т.е. фактически в центре сверла. Поскольку на данном участке невозможно срезать металл, его необходимо переместить за пределы этого участка методом пластического деформирования, а затем срезать. Это достигается, например, созданием на сверле конуса или перемычки.

Подводя итоги, можно заключить, что зависимость (6) справедлива в диапазоне изменения текущего радиуса R_i от значения $\frac{S}{2\pi \cdot f}$ до радиуса

сверла R . Графически данная закономерность проиллюстрирована на рис. 5. Для значений $f=0,3$; $S=0,6$ мм/об текущий радиус R_i изменяется в диапазоне $R_i \geq 0,318$ мм, поскольку при $R_i < 0,318$ мм процесс резания неосуществим. Коэффициент резания $K_{рез}$ при этом уменьшается от бесконечности до значения 3,33. Следует обратить внимание на то, что с увеличением R_i коэффициент резания $K_{рез}$ уменьшается довольно интенсивно. Поэтому существенному изменению коэффициент резания $K_{рез}$ подвержен лишь при относительно небольших значениях R_i . Для определения условного напряжения σ преобразуем зависимость (1) с учетом зависимости (2):

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot \left[\operatorname{tg}(\psi - \gamma) + \frac{1}{\cos(\psi - \gamma)} \right]. \quad (8)$$

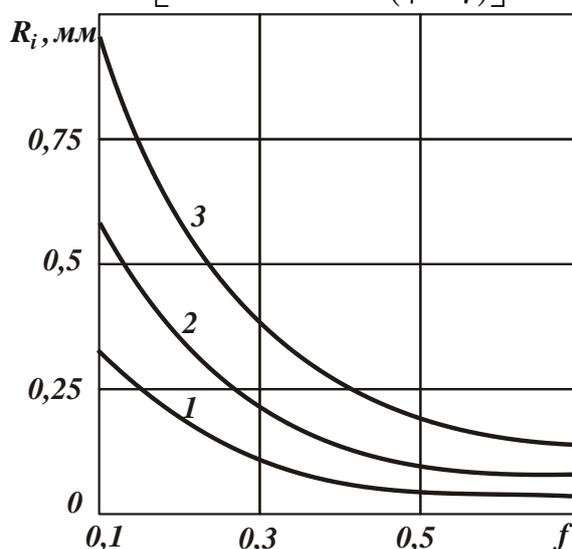


Рис. 4. Зависимость R_i от f : 1 – $S=0,2$ мм/об; 2 – $S=0,4$ мм/об; 3 – $S=0,6$ мм/об.

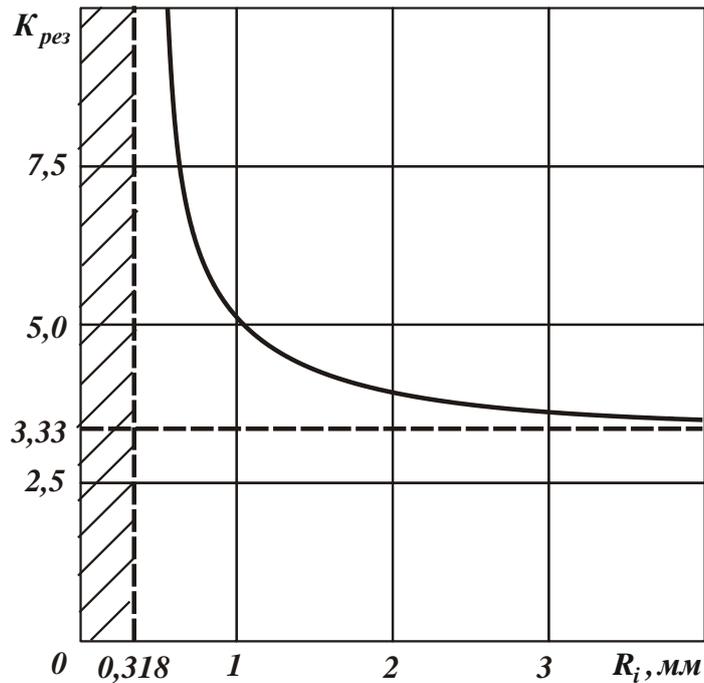


Рис. 5. Зависимость $K_{рез}$ от R_i ($f=0,3$; $S=0,6$ мм/об).

При изменении угла трения ψ в пределах до $30-40^\circ$, независимо от переднего угла режущего лезвия сверла γ , функция $\cos(\psi - \gamma)$ будет принимать значения, близкие к единице. Поэтому для упрощения расчетов в первом приближении примем $\cos(\psi - \gamma) \approx 1$. Тогда зависимость (8) опишется:

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot [\operatorname{tg}(\psi - \gamma) + 1] = \sigma_{сж} \cdot \left[\frac{\left(f - \frac{S}{2\pi \cdot R_i} \right)}{\left(1 + f \cdot \frac{S}{2\pi \cdot R_i} \right)} + 1 \right]. \quad (9)$$

Также как и коэффициент резания $K_{рез}$, условное напряжение резания σ зависит от текущего радиуса R_i . Чем меньше R_i , тем меньше σ , т.е. ниже силовая напряженность процесса резания при сверлении.

Используя полученные зависимости (6) и (9), определим составляющие силы резания P_z , P_y и P_x . Составляющая P_z определяется произведением условного напряжения резания σ и площади поперечного сечения среза $S_{срез}$. Поскольку условное напряжение резания σ является переменной величиной по длине режущего лезвия сверла, т.е. зависит от текущего значения R_i , то P_z можно представить в виде:

$$P_z = \sum_i P_{z_i} = \sum_i \sigma_i \cdot \Delta S_{срез}, \quad (10)$$

где P_{z_i} – элементарная составляющая силы P_z , действующая на элементарную площадку режущего лезвия площадью $\Delta S_{срез} = a \cdot \Delta R_i$ (рис. 6); a – толщина среза, м; ΔR_i – длина элементарной площадки режущего лезвия сверла, м.

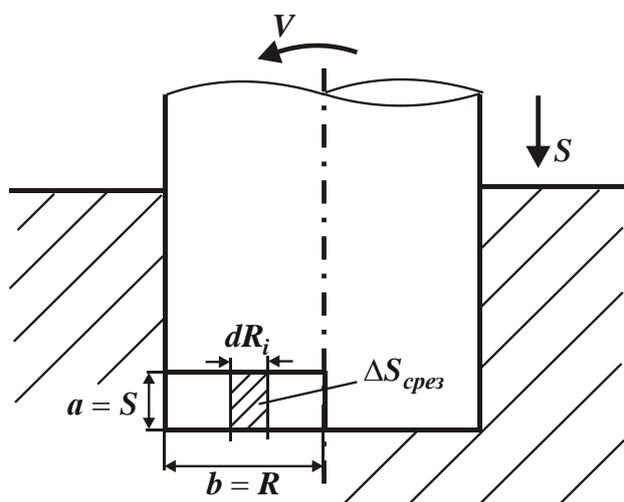


Рис. 6. Расчетная схема параметров процесса сверления.

Условное напряжение резания σ_i , входящее в зависимость (10), определяется зависимостью (9). В данном случае, поскольку угол сверла в плане φ принят равным нулю, толщина среза a определится как $a = S/2$. Заменяем в зависимости (10) суммирование интегрированием. Поскольку нижний предел интегрирования $R_1 = \frac{S}{2\pi \cdot f}$, как было показано выше, принимает весьма малые значения, для упрощения расчетов будем считать, что $R_1 = 0$, тогда:

$$P_z = \int_0^R \sigma_i \cdot dS_{\text{среза}} = 0,5 \cdot \sigma_{\text{сж}} \cdot S \cdot \left[(1+f)R - \frac{S}{2\pi} \cdot (1+f^2) \cdot \ln \left(1 + \frac{2\pi}{S} \cdot \frac{R}{f} \right) \right]. \quad (11)$$

В результате интегрирования пришли к довольно сложной аналитической зависимости для определения тангенциальной составляющей силы резания P_z . Из нее вытекает, что вполне однозначное влияние на P_z оказывает лишь параметр $\sigma_{\text{сж}}$. Остальные параметры (S, f, R) неоднозначно влияют на тангенциальную составляющую силы резания P_z . Для количественной оценки влияния указанных параметров на P_z , следует провести исследование функции P_z на экстремум. Однако, как нами установлено, решить данную задачу чисто аналитически чрезвычайно трудно, т.к. подчиняя функцию P_z условию экстремума (после ее дифференцирования по переменным S, f, R), приходим к очень сложным трансцендентным уравнениям, требующим применения численных расчетов. Это снижает наглядность полученных решений. Поэтому проведем упрощенный анализ характера изменения P_z от параметров S, f, R .

Из зависимости (11) нетрудно видеть, что второе слагаемое, заключенное в квадратные скобки, меньше первого слагаемого. Следовательно, при определении P_z будет доминировать первое слагаемое. Из этого можно заключить, что с увеличением подачи S первое слагаемое будет увеличиваться по линейной зависимости, а второе слагаемое будет уменьшаться, однако с меньшей интенсивностью. Следовательно, с

увеличением подачи S тангенциальная составляющая силы резания P_z будет увеличиваться с интенсивностью ниже линейной.

С увеличением радиуса сверла R первое слагаемое зависимости (11) будет увеличиваться по линейному закону, а второе слагаемое будет уменьшаться, но с меньшей интенсивностью. В результате тангенциальная составляющая силы резания P_z с увеличением радиуса сверла R , как и с увеличением подачи S , будет увеличиваться с интенсивностью ниже линейной.

С увеличением коэффициента трения f обрабатываемого материала с передней поверхностью режущего лезвия сверла будет наблюдаться аналогичная закономерность, т.е. в результате доминирования первого слагаемого в зависимости (11) тангенциальная составляющая силы резания P_z будет увеличиваться с интенсивностью ниже линейной.

Используя зависимость (11), определим крутящий момент $M = 0,5 \cdot R \cdot P_z$ при сверлении:

$$M = 0,25 \cdot \sigma_{сж} \cdot S \cdot R \cdot \left[(1+f)R - \frac{S}{2\pi} \cdot (1+f^2) \cdot \ln \left(1 + \frac{2\pi \cdot R}{S \cdot f} \right) \right]. \quad (12)$$

Как видно, радиус сверла R в большей степени влияет на крутящий момент M , чем на тангенциальную составляющую силы резания P_z . Это хорошо согласуется с известными экспериментальными данными, выраженными в виде эмпирической зависимости [5]:

$$M = C_2 \cdot D^{x_M} \cdot S^{y_M}, \quad (13)$$

где D – диаметр сверла, м; C_2 – постоянная, определяемая параметрами обработки (кроме диаметра сверла D и подачи S); $x_M = 2,0$; $y_M = 0,8 - 0,9$.

Учитывая преобладание первого слагаемого над вторым в зависимости (12), нетрудно видеть, что с увеличением радиуса сверла R (или его диаметра D) крутящий момент M будет увеличиваться по квадратичной зависимости, а с увеличением подачи S – увеличиваться примерно по линейной зависимости, рис. 7. Такие же закономерности изменения крутящего момента M вытекают из эмпирической зависимости (13), что свидетельствует о достоверности полученной аналитической зависимости (12).

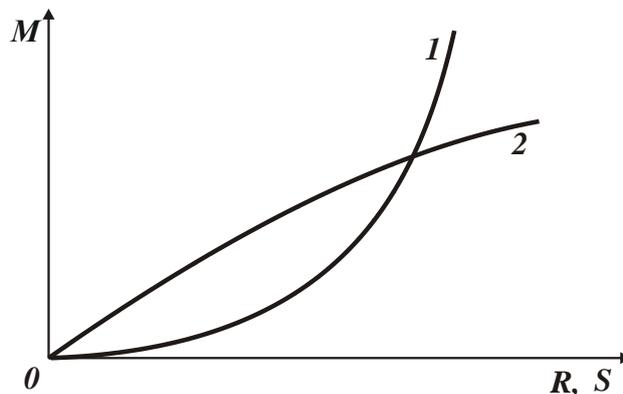


Рис. 7. Примерные зависимости крутящего момента M от радиуса сверла R (1) и подачи S (2).

Проведенный теоретический анализ изменения тангенциальной составляющей силы резания P_z и крутящего момента M справедлив для условия $2\varphi=180^\circ$. Представляет интерес оценка влияния угла сверла в плане φ (изменяющегося в пределах $0\dots90^\circ$) на параметры P_z и M . С физической точки зрения, влияние угла φ проявляется в уменьшении толщины среза a и увеличении ширины среза b . Поэтому, чтобы учесть угол φ в зависимости (11), необходимо вместо подачи S подставить выражение для определения толщины среза $a=S\cdot\sin\varphi$, а вместо радиуса сверла R – выражение $b=R/\sin\varphi$. Это связано с тем, что в зависимости (11) подача S была равна толщине среза a , а радиус сверла R выполнял роль ширины среза b , т.к. угол $2\varphi=180^\circ$. С учетом сказанного зависимость (11) примет вид:

$$P_z = 0,5 \cdot \sigma_{сж} \cdot S \cdot \left[(1+f) \cdot R - \frac{S \cdot \sin^2 \varphi}{2\pi} \cdot (1+f^2) \cdot \ln \left(1 + \frac{2\pi}{S \cdot \sin^2 \varphi} \cdot \frac{R}{f} \right) \right]. \quad (14)$$

Используя зависимость (14), определим крутящий момент $M = 0,5 \cdot R \cdot P_z$ при сверлении:

$$M = 0,25 \cdot \sigma_{сж} \cdot S \cdot R \cdot \left[(1+f) \cdot R - \frac{S \cdot \sin^2 \varphi}{2\pi} \cdot (1+f^2) \cdot \ln \left(1 + \frac{2\pi}{S \cdot \sin^2 \varphi} \cdot \frac{R}{f} \right) \right]. \quad (15)$$

Как следует из зависимости (15), угол φ входит лишь во второе слагаемое зависимости. Причем, оказывает на него неоднозначное влияние, т.к. входит функцией синус в числитель и знаменатель. Очевидно, что с увеличением угла φ логарифмическая функция будет уменьшаться с меньшей интенсивностью по сравнению с ростом функции $\sin^2 \varphi$, входящей в числитель второго слагаемого. Поэтому с увеличением угла φ второе слагаемое будет увеличиваться, вызывая уменьшение крутящего момента M . Этим теоретически показано, что с увеличением угла φ крутящий момент M должен уменьшаться, рис. 8, что согласуется с известными экспериментальными данными, рис. 9 [5].

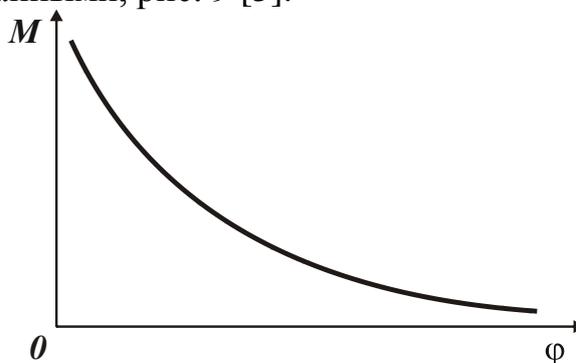


Рис. 8. Примерная зависимость крутящего момента M от угла φ .

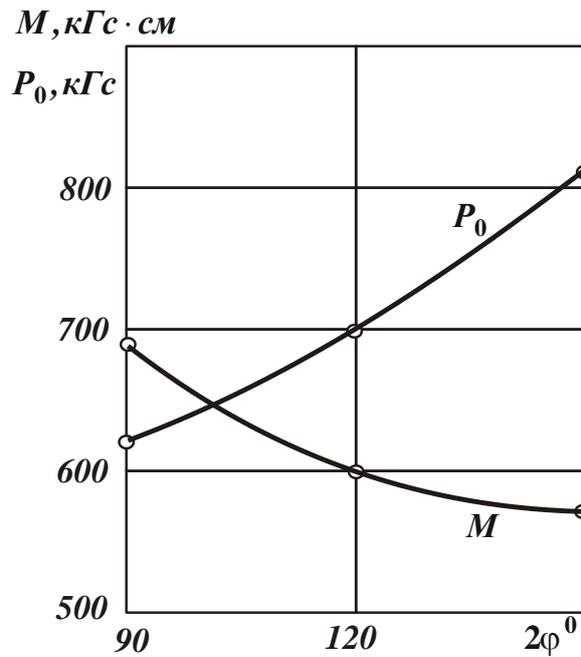


Рис. 9. Влияние угла 2φ на осевую силу P_0 и крутящий момент M при сверлении стали.

Необходимо отметить, что такой же характер изменения P_z от угла реза в плане φ установлен и при продольном точении [5]. С физической точки зрения это обусловлено уменьшением условного напряжения резания σ в следствие увеличения коэффициента резания $K_{рез}$ в соответствии с зависимостью (1) за счет увеличения фактического переднего угла инструмента γ (в связи с увеличением соотношения a/b и улучшением условий стружкообразования). Возможна также экстремальная зависимость P_z от φ , что согласуется с теоретическими данными.

Аналогично тангенциальной составляющей силы резания P_z , можно определить радиальную P_y и осевую P_x составляющие силы резания:

$$\begin{aligned}
 P_y = 0,5\sigma_{сж} S \cos \varphi \left\{ R \cdot f(1+f) - \frac{S \sin \varphi}{2\pi} (1+f^2)(1+2f) \ln \left(1 + \frac{2\pi R}{f \cdot S \sin \varphi} \right) + \right. \\
 \left. + \left(\frac{S}{2\pi} \right)^2 (1+f^2)^2 \sin \varphi \cdot \left[\frac{2\pi}{f \cdot S} - \frac{1}{\left(\frac{R}{\sin \varphi} + \frac{f \cdot S}{2\pi} \right)} \right] \right\}, \quad (16) \\
 P_x = 0,5\sigma_{сж} S \sin \varphi \left\{ R \cdot f(1+f) - \frac{S \sin \varphi}{2\pi} (1+f^2)(1+2f) \ln \left(1 + \frac{2\pi R}{f \cdot S \sin \varphi} \right) + \right.
 \end{aligned}$$

$$+ \left(\frac{S}{2\pi} \right)^2 (1 + f^2)^2 \sin \varphi \cdot \left[\frac{2\pi}{f \cdot S} - \frac{1}{\left(\frac{R}{\sin \varphi} + \frac{f \cdot S}{2\pi} \right)} \right] \}. \quad (17)$$

Детальный анализ приведенных зависимостей показал, что с увеличением угла φ радиальная составляющая силы резания P_y уменьшается, а осевая составляющая силы резания P_x увеличивается. Это согласуется с экспериментальными данными [5]. Таким образом, аналитически описаны параметры силовой напряженности процесса сверления, что позволило провести теоретический анализ условий уменьшения составляющих силы резания (с целью уменьшения погрешностей обработки отверстия).

Список литературы: 1. Новиков Ф.В., Иванов И.Е. Повышение эффективности механической обработки высокоточного резьбового отверстия в горловине газового баллона. – Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2006. – Вып. 70. – С. 350-355. 2. Новиков Ф.В., Иванов И.Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления внутренних герметических резьб в горловинах газовых баллонов в условиях крупносерийного и массового производства. Физические и компьютерные технологии. - Труды 12-й Международной научно-технической конференции, 7-8 июня 2006г. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2006. – С. 3-9. 3. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учебное пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.