

## К РАСЧЕТУ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Коваленко В.И., Колесов А.П. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

**Аннотация.** В статье выявлены закономерности изменения сил резания вдоль режущей кромки сверла в зависимости от относительного радиуса анализируемой точки и с учетом точности сверла и симметричности процесса резания. Предложена классификация процесса сверления с точки зрения взаимосвязи подачи, точности изготовления сверла и формы передней поверхности сверла.

**Ключевые слова:** симметричное сверление, условия резания, силы резания.

### 1. Введение

Возникающие в процессе сверления силы резания в значительной степени определяют процесс обработки, оказывая влияние на точность обрабатываемых поверхностей. Исследованию силовых зависимостей при сверлении посвящены многие работы, например [1,2]. Проведенные авторами исследования [3] показали, что большое значение имеет соотношение между элементами режимов резания и точностью изготовления сверл, в частности, между подачей на зуб сверла и осевым биением режущих кромок инструмента. В зависимости от вышеуказанного соотношения возможно резание симметричное и асимметричное, двухстороннее и одностороннее. Значения возникающих сил резания при этом будут различны. Указанные закономерности анализируются при расчете тангенциальной силы резания - при обработке стали сверлом с плоской передней поверхностью, режущая часть которого выполнена из твердого сплава.

### 2. Основное содержание и результаты работы

На рис.1 представлена классификация процесса сверления с точки зрения взаимосвязи подачи, точности изготовления и формы передней поверхности сверла.

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на процесс резания, в том числе и на возникающие при сверлении силы резания, является толщина среза.

С учетом соотношения допуска осевого биения сверла и подачи на зуб принимается одно из решений А,В,С,Д,Е (см. [3], рис.2).

Симметричное резание имеет место при строго симметричной заточке режущих кромок сверла. В этом случае осевое биение режущих кромок инструмента равно нулю:  $B_{sim} = 0$ , а толщина среза определится из выражения:

$$a_{sim} = S_Z \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $S_Z$  – подача на зуб сверла;  $\varphi$  - главный угол в плане.

Обеспечить абсолютно точную (симметричную) заточку режущих кромок сверла практически невозможно; следовательно, обычно реализуется процесс асимметричного резания. Из справочника [4] известно, что с точки зрения точности режущего инструмента применяют сверла общего назначения и точного исполнения, которые отличаются, в частности, допуском осевого биения режущих кромок сверла.

При реализации процесса резания в зависимости от исходных условий обработки назначается подача при сверлении и выбирается сверло определенной точности.

Например, для сверла общего назначения, если  $S_Z \geq B_{ob}$  (где  $B_{ob}$  - допуск осевого биения сверла общего назначения) осуществляется двухстороннее асимметричное резание и для определения значений элементов толщины среза ( $a_{max,A}$ ,  $a_{min,A}$  и разница между ними  $\Delta a_A$ ) принимается решение «А» [3], представленное нижеприведенными уравнениями:

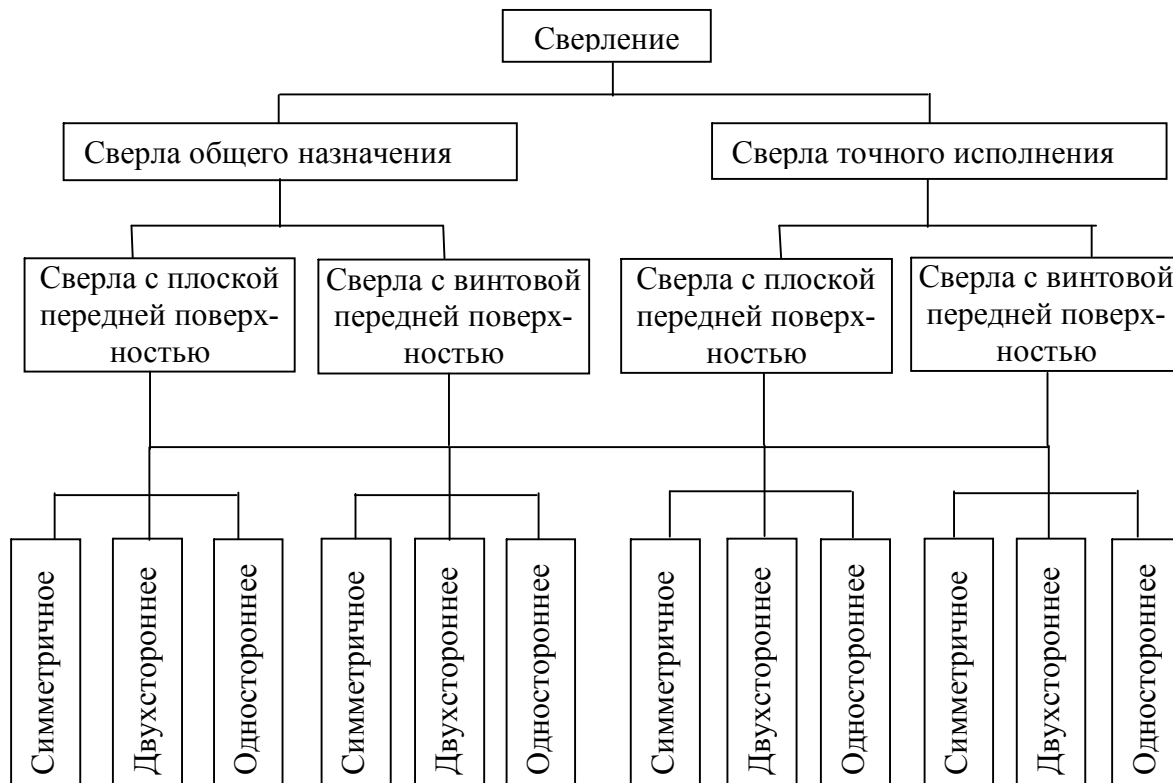


Рис. 1. Классификация процесса сверления с точки зрения взаимосвязи подачи, точности изготовления и формы передней поверхности сверла

$$a_{max,A} = S_{Zl} \sin \varphi + B_{ob} \sin \varphi ; \quad (2)$$

$$a_{min,A} = S_{Zl} \sin \varphi - B_{ob} \sin \varphi ; \quad (3)$$

$$\Delta a_A = 2 B_{ob} \sin \varphi , \quad (4)$$

Перейдем к рассмотрению тангенциальной силы резания  $P_z$ , значение которой может быть определено из выражения:

$$P_z = 0,9 S_Z t \sigma_B (\operatorname{ctg} \theta + 1), \quad (5)$$

где  $t$  – глубина резания;  $\sigma_B$  – предел прочности на растяжение обрабатываемого материала;  $\theta$  – угол скалывания. Учитывая, что  $S_Z = a / \sin \varphi$  (где  $a$  – толщина среза), получим:

$$P_z = 0,9 \cdot t \cdot \sigma_B \cdot \frac{(\operatorname{ctg} \theta + 1)}{\sin \varphi} \cdot a . \quad (6)$$

В полученном уравнении (6) важным является то обстоятельство, что толщина среза  $a$  входит в выражение в явном виде. Это позволяет вычислять различные значения тангенциальной силы  $P_z$  при соответствующих значениях величины  $a$ . Вычислив по выражению (1) толщину среза при симметричном резании  $a_{sim}$ , по формуле (6) можно определить тангенциальную силу резания  $P_{z(sim)}$ , возникающую при отсутствии осевого биения режущих кромок сверла, то есть при симметричном резании. При асимметричном резании можно вычислить минимальное  $P_{z(min)}$  и максимальное  $P_{z(max)}$  значе-

ния тангенциальной силы резания, зная соответственно минимальную  $a_{min}$  и максимальную  $a_{max}$  величины толщины среза в зависимости от принятого решения «А» – «Е».

По «Справочнику» [5] для заданных условий обработки находим рекомендованное значение подачи:  $S = 0,372$  мм/об. (отметим, что величина подачи назначается вне зависимости от точности изготовления сверла). Так как ( $S_Z = 0,186$  мм/зуб)  $>$  ( $B_{ob} = 0,15$  мм), то имеет место 1-й вышерассмотренный случай (см. [3], выражение (2)); предположим, что в процессе обработки используется сверло общего назначения. В этом случае принимается решение «А», то есть реализуется асимметричное двухстороннее резание.

На рис. 2 представлены графики изменения вдоль режущей кромки сверла тангенциальной силы резания  $P_z$  при асимметричном двухстороннем резании: кривые 1а и 1б – максимальное и минимальное значения силы резания соответственно. По оси абсцисс отложен относительный радиус  $A_x = r_x/r$  (где  $r_x$  – радиус анализируемой точки;  $r$  – номинальный радиус сверла).

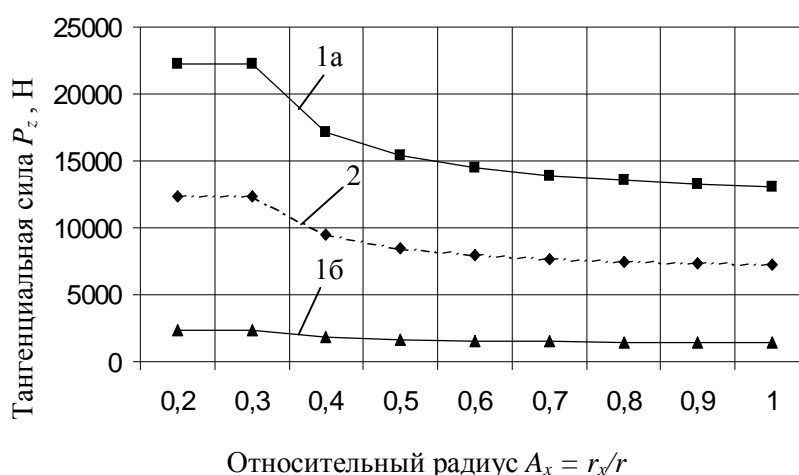


Рис. 2. Изменение вдоль режущей кромки сверла тангенциальной силы резания  $P_z$  в условиях принятия решения «А» ( $S_Z > B_{ob}$ ; сверло общего назначения): 1а и 1б – при асимметричном двухстороннем резании (максимальное и минимальное значения силы резания соответственно); 2 – при симметричном резании

Кроме того, на этом же рис. 2 (для сопоставления) представлена кривая 2, соответствующая случаю симметричного резания. Графики показывают, что при перемещении расчетной точки вдоль режущей кромки, значения силы  $P_z$  возрастают от периферии к центру.

Теперь предположим, что в тех же условиях 1-го вышерассмотренного случая используется сверло точного исполнения. В этом случае принимается решение «В», то есть также реализуется асимметричное двухстороннее резание. Полученные значения силы  $P_z$  занесены в табл. 1 (с целью сопоставления результатов в эту же таблицу занесены также значения величины  $P_z$ , рассчитанные при принятии решения «А»).

Изменим условия резания. Предположим, что сверление выполняется в условиях малой жесткости системы СПИЗ (при этом остальные условия обработки остаются неизменными). Рассчитанное по «Справочнику» [5] рекомендованное значение подачи составит:  $S = 0,186$  мм/об. ( $S_Z = 0,093$  мм/зуб). Так как выполняется неравенство ( $B_{to} = 0,08$  мм)  $<$  ( $S_Z = 0,093$  мм/зуб)  $<$  ( $B_{ob} = 0,15$  мм), то будет иметь место 2-й из вышерассмотренных случаев процесса резания (см. [3], выражение (3)).

При использовании сверл общего назначения принимается решение «С», при котором реализуется одностороннее асимметричное резание. Так как в этом случае на-

груженной является только одна режущая кромка сверла, то минимальное значение тангенциальной силы резания  $P_z$  равно нулю, а максимальное значение равно удвоенному значению силы  $P_z$ , определенной для условий симметричного резания.

При применении сверл точного исполнения (при сохранении постоянства остальных факторов) принимается решение «D», которому соответствует двухстороннее асимметричное резание. Расчетные зависимости для определения тангенциальной силы резания  $P_z$  также приведены в табл. 1.

Еще раз изменим условия процесса резания. Предположим (при сохранении неизменными остальных условий обработки), что в заготовке требуется получить более глубокое, чем ранее, отверстие: глубина отверстия  $l = 270$  мм ( $l/d = 6$ ). Для указанных условий обработки принимаем рекомендованное по «Справочнику» [5] значение подачи:  $S = 0,148$  мм/об. Так как ( $S_Z = 0,074$  мм/зуб)  $<$  ( $B_{to} = 0,08$  мм)  $<$  ( $B_{ob} = 0,15$  мм), то имеет место 3-й из вышерассмотренных случаев процесса резания (см. [3], выражение (4)). При этом, независимо от точности изготовления сверла, принимается решение «E», при котором реализуется одностороннее асимметричное резание. Значения этой тангенциальной силы резания  $P_z$  также приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения тангенциальной силы резания  $P_z$ , Н по длине режущей кромки сверла в условиях принятия решений А, В, С, D, E

$A_x = r_x/r$		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
Решение	А	$P_{z(max)}$	22228	22228	17138	15376	14467	13907	13527	13251	13041
		$P_{z(min)}$	2381	2381	1836	1647	1550	1490	1449	1420	1397
		$P_{z(sim)}$	12305	12305	9487	8512	8008	7699	7488	7336	7220
	В	$P_{z(max)}$	17597	17597	13568	12173	11453	11010	10709	10491	10325
		$P_{z(min)}$	7012	7012	5407	4851	4564	4387	4268	4180	4114
		$P_{z(sim)}$	12305	12305	9487	8512	8008	7699	7488	7336	7220
	С	$P_{z(max)}$	12305	12305	9487	8512	8008	7699	7488	7336	7220
		$P_{z(sim)}$	6152	6152	4744	4256	4004	3849	3744	3668	3610
	D	$P_{z(max)}$	11444	11444	8824	7917	7449	7161	6965	6823	6715
		$P_{z(min)}$	860	860	663	595	560	538	523	513	505
		$P_{z(sim)}$	6152	6152	4744	4256	4004	3849	3744	3668	3610
	E	$P_{z(max)}$	9791	9791	7549	6773	6372	6126	5958	5836	5745
		$P_{z(sim)}$	4895	4895	3775	3386	3186	3063	2979	2918	2872

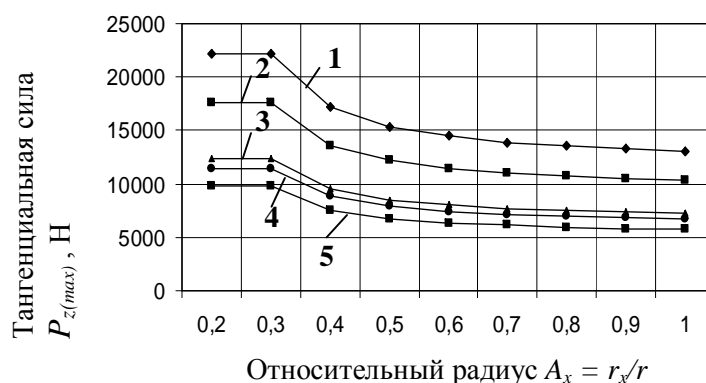


Рис. 3. Изменение вдоль режущей кромки сверла максимальной тангенциальной силы резания  $P_{z(max)}$  в условиях принятия соответствующих решений: 1 - «А»; 2 - «В»; 3 - «С»; 4 - «D»; 5 - «E»

Для более наглядного сопоставления результатов вычислений, полученных при принятии различных решений, на рис. 3 представлены кривые, показывающие изменение вдоль режущей кромки сверла максимальной тангенциальной силы резания  $P_{z(max)}$ ; кривые 1 – 5, соответствуют принятию решений «А» - «Е».

Анализ табл. 1 и рис. 3 показывает, что характер изменения силы  $P_{z(max)}$  для различных исследованных случаев процесса сверления остается неизменным; числовые же значения существенно разнятся.

Наибольшие числовые значения силы резания  $P_z$  имеют место при соблюдении наиболее благоприятных условий процесса резания: высокая жесткость системы СПИЗ, сверло общего назначения (решение «А»), когда снимаемые при обработке толщины среза максимальны. При использовании более точного сверла (точного исполнения) толщины среза уменьшаются и, соответственно, снижаются силы резания (решение «В»). При уменьшении жесткости системы СПИЗ рекомендуемые значения подач уменьшаются; при этом снижаются как толщины среза, так и силы резания  $P_z$ : при применении неточных сверл (решение «С») – в меньшей степени, а для более точных сверл – в большей степени (решение «D»). Если же условия резания становятся наименее благоприятными – например, обработка глубоких отверстий (решение «Е») – то и анализируемые параметры (рекомендуемая подача, толщина среза, тангенциальная сила резания  $P_z$ ) принимают минимальные значения.

Анализ рис. 2 и табл. 1 показывает, что числовые значения анализируемых величин для относительных радиусов  $A_x = 0,2$  и  $A_x = 0,3$  совершенно одинаковы: например,  $P_{z(max)} = 22228$  Н (решение «А»). Для выяснения причины этого обстоятельства проанализируем выражение (6) для определения тангенциальной силы резания  $P_z$ . В это выражение в качестве фактора входит угол скалывания  $\theta$ .

Из теории резания известно, что предельное значение угла скалывания  $\theta$  составляет  $45^\circ$ . Расчеты показали, что для  $A_x = 0,2$  и  $A_x = 0,3$  значение угла  $\theta > 45^\circ$ . Следовательно, при проведении вычислений тангенциальной силы резания  $P_z$  (выражение 6) для этих относительных радиусов необходимо принимать  $\theta = 45^\circ$ . Поэтому расчетные значения величины  $P_z$  (для  $A_x = 0,2$  и  $A_x = 0,3$ ) также будут одинаковыми.

Для оценки полученных результатов сопоставим значения рассчитанных в работе тангенциальных сил резания  $P_z$  со значениями, определенными по общепризнанному «Справочнику технолога-машиностроителя» [5]. Проанализируем все рассмотренные в работе решения, то есть решения «А» - «Е». Для одних и тех же начальных условий в соответствии с общепринятой методикой по «Справочнику» [5] определим тангенциальную силу резания  $P_z$ . Для сопоставления примем тангенциальную силу резания  $P_{z(sim)}$ , определенную в настоящей работе для условий симметричного резания при относительном расчетном радиусе  $A_x = 0,5$  (см. табл. 1). В результате сравнения анализируемых значений подсчитана погрешность  $\Delta$ , %, определяемая по выражению

$$\Delta, \% = \frac{P_{z(sim)} - P_z}{P_z} \cdot 100\% . \quad (7)$$

Результаты выполненного сопоставления представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сопоставление значений тангенциальной силы резания  $P_z$

Решение	$S$ , мм/об	$P_z$ , Н по [5]	$P_{z(sim)}$ , Н	$\Delta$ , %
А; В	0,372	7482	8512	13,6
С; D	0,186	4297	4256	-1,0
Е	0,149	3595	3386	-5,8

Анализ табл. 2 показывает, что результаты сопоставления могут быть признаны удовлетворительными. Уточним, что предлагаемая методика позволяет рассчитывать тангенциальную силу резания не только для теоретически выполнимого симметричного резания, но также для практически реализуемых различных случаев асимметричного как двухстороннего, так и одностороннего резания.

### 3. Заключение

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложена классификация процесса сверления с точки зрения взаимосвязи подачи, точности изготовления сверла и формы передней поверхности сверла.

2. Для иллюстрации теоретических положений определения тангенциальной силы резания  $P_z$  рассмотрен числовой пример использования полученных зависимостей.

3. При определении тангенциальной силы резания  $P_z$  выполнено сопоставление результатов, полученных в работе, со значениями, определенными по «Справочнику технолога-машиностроителя» [5]; получено удовлетворительное совпадение результатов.

**Список литературы:** 1. Сурженко А.Н. Совершенствование сборных комбинированных зенкеров за счет допустимого уменьшения узлов крепления режущих пластин. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Донецк, 2001. 16 с. 2. Филоненко С.Н. Резание металлов. - Киев: Вища школа, 1969. – 260 с. 3. Малышко И.А., Коваленко В.И. Расчет тангенциальной составляющей силы резания при сверлении с учетом соотношения подачи на зуб и осевого биения сверла // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2005, Вып. 29. С. 116 - 121. 4. Справочник инструментальщика/ И.А. Ординарцев, С.Г. Филиппов, А.Н. Шевченко и др.; Под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 846 с. 5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. Под ред. А.М. Дальского. - М.: Машиностроение -1, 2001. - 944 с.

Надійшла до редколегії 10.01.2010 р.

### **TO CALCULATION OF TANGENTIAL FORCE OF CUTTING BY DRILLING**

**Kovalenko V.I., Kolesov A.P. (DONNTU, Donetsk, Ukraine)**

**Annotation.** In the given article we are studying and examining the effect of changing cutting forces along the drill cutting edge depending on different points and the edge radius, and taking into account the precision and cutting process symmetry. A classification of the drilling process from the side of the relationship of submission, manufacturing drills accuracy and shape of the front surface drill.

**Keywords:** symmetric drilling, cutting conditions, cutting forces.

### **ДО РОЗРАХУНКУ ТАНГЕНЦІАЛЬНОЇ СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ СВЕРДЛІННІ**

**Коваленко В.І., Колесов О.П. (ДОННТУ, м. Донецьк, Україна)**

**Анотація.** У статті виявлені закономірності зміни сил різання уздовж ріжучого пруга свердла залежно від відносного радіуса аналізованої точки і з урахуванням точності свердла і симетричності процесу різання. Запропонована класифікація процесу свердління з погляду взаємозв'язку подачі, точності виготовлення свердла і форми передньої поверхні свердла.

**Ключові слова:** симетричне свердління, умови різання, сили різання.