

Е. С. ВИКСМАН

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ ВРАЩАЮЩИМИСЯ РЕЗЦАМИ

Нарезание резьбы вращающимися резцами может осуществляться при внешнем и внутреннем касании. Каждая из этих схем имеет определенные преимущества и недостатки, которые обуславливают целесообразность их применения при нарезании различных резьб.

В статье рассматриваются кинематические факторы, определяющие пригодность этих схем при нарезании различных резьб. Анализ этих факторов позволяет объяснить сущность явлений, сопровождающих процесс резания и дать рекомендации по выбору режима резания для различных резьб в зависимости от требуемой точности и чистоты поверхности.

В статье мы преследуем цель сопоставить процесс нарезания резьбы при внешнем и внутреннем касании.

### ОБЪЕМ МЕТАЛЛА, СНИМАЕМОГО ЗА ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ

Объем металла, снятого за одну минуту, с достаточной точностью определится из выражения:

$$Q = fL \text{ мм}^3, \quad (1)$$

где  $Q$  — объем снятого за одну минуту металла (в  $\text{мм}^3$ );  
 $f$  — площадь сечения впадины резьбы (в  $\text{мм}^2$ );  
 $L$  — длина впадины резьбы, нарезанной за одну минуту (в  $\text{мм}$ ).  
Площадь впадины треугольной резьбы в осевом сечении

$$f = \frac{s(r_0 - r_1)}{2} \text{ мм}^2,$$

где  $s$  — шаг резьбы (в  $\text{мм}$ );  
 $r_0$  — наружный радиус резьбы (в  $\text{мм}$ );  
 $r_1$  — внутренний радиус резьбы (в  $\text{мм}$ ).

Если в формулу (2) подставить значения  $(r_0 - r_1)$  для метрической резьбы

$$(r_0 - r_1) = 0,6495 s$$

и дюймовой резьбы

$$(r_0 - r_1) = 0,6403 s,$$

то получим

для метрической резьбы

$$f = \frac{0,6495}{2} s^2 = 0,32475 s^2 \text{ мм}^2, \quad (3)$$

для дюймовой резьбы

$$f = \frac{0,6403}{2} s^2 = 0,32015 s^2 \text{ мм}^2. \quad (4)$$

У треугольных резьб площадь впадины находится в квадратной зависимости от шага.

Площадь впадины трапециевидальной резьбы в осевом сечении равна:

$$f = \frac{(s - 2z \operatorname{tg} 15^\circ)(s + 2z)}{4} \text{ мм}^2, \quad (5)$$

где  $z$  — номинальный зазор между выступом гайки и дном впадины резьбы винта.

Для резьб с шагом от 2 до 4 мм  $z = 0,25$  мм; с шагом от 5 до 12 мм  $z = 0,5$  мм; с шагом от 16 до 40 мм  $z = 1$  мм.

После подстановки значения  $z$ ,  $\operatorname{tg} 15^\circ$  и некоторых преобразований получим формулы для определения площади впадины трапециевидальных резьб.

Для резьб с шагом от 2 до 4 мм:

$$f = \frac{s^2}{4} + 0,091506 s - 0,0167469;$$

с шагом от 5 до 12 мм

$$f = \frac{s^2}{4} - 0,18301 s - 0,0669875;$$

с шагом от 16 до 40 мм

$$f = \frac{s^2}{4} - 0,36602 s - 0,26795.$$

Учитывая, что в этих трех выражениях значения последних чисел очень малы и даже при небольшом шаге резьбы их влияние на определяемое значение площади впадины практически ничтожно, ими можно пренебречь. После округления получим

$$f = \frac{s^2}{4} + 0,09 s \text{ мм}^2; \quad (6)$$

$$f = \frac{s^2}{4} + 0,18 s \text{ мм}^2; \quad (7)$$

$$f = \frac{s^2}{4} + 0,37 s \text{ мм}^2. \quad (8)$$

С практически достаточной точностью длина впадины резьбы, нарезанной за одну минуту (при нарезании за один проход), может быть определена по формуле

$$L = \frac{\pi (r_0 + r_1)}{\cos \beta_{cp}} n_u = \frac{\pi d_{cp}}{\cos \beta_{cp}} n_u, \quad (9)$$

где  $n_u$  — число оборотов изделия в минуту;

$\beta_{cp}$  — угол подъема средней линии резьбы.

Подставив в формулу [1] найденные значения  $f$  и  $L$ , получим формулы для определения объема металла, срезаемого за одну минуту при нарезании различных резьб.

Для метрической резьбы

$$Q = \frac{1,02 s^2 d_{cp} n_u}{\cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3. \quad (10)$$

Для дюймовой резьбы

$$Q = \frac{1,005 s^2 d_{cp} n_u}{\cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3. \quad (11)$$

Для трапецидальной резьбы:

с шагом от 2 до 4 мм

$$Q = \frac{(0,785 s^2 + 0,283 s) \cdot d_{cp} n_u}{\cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3, \quad (12)$$

с шагом от 5 до 12 мм

$$Q = \frac{(0,785 s^2 + 0,565 s) d_{cp} n_u}{\cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3; \quad (13)$$

с шагом от 16 до 40 мм

$$Q = \frac{(0,785 s^2 + 1,16 s) d_{cp} n_u}{\cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3. \quad (14)$$

#### ОБЪЕМ СТРУЖКИ

Если в резцовой головке установлено  $z_1$  резцов и она делает в минуту  $n_p$  оборотов, то количество стружек, снятых за одну минуту, будет равно

$$k = n_p z_1, \quad (15)$$

где  $k$  — число снятых за одну минуту стружек.

Объем одной стружки можно определить из выражения

$$q = \frac{Q}{k} \text{ мм}^3. \quad (16)$$

Подставив в выражение (16) значения  $Q$  из формул (10), (11), (12), (13) и (14) и значение  $k$  из формулы (15), получим формулы для определения объема стружки при нарезании различных резьб.

Для метрической резьбы

$$q = \frac{1,02 s^2 d_{cp} n_u}{n_p z_1 \cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3. \quad (17)$$

Для дюймовой резьбы

$$q = \frac{1,005 s^2 \cdot d_{cp} n_u}{n_p z_1 \cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3. \quad (18)$$

Для трапецеидальных резьб с шагом от 2 до 4 мм

$$q = \frac{(0,785 s^2 + 0,283 s) d_{cp} \cdot n_u}{n_p z_1 \cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3, \quad (19)$$

с шагом от 5 до 12 мм

$$q = \frac{(0,785 s^2 + 0,565 s) d_{cp} \cdot n_u}{n_p z_1 \cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3, \quad (20)$$

с шагом от 16 до 40 мм

$$q = \frac{(0,785 s^2 + 1,16 s) d_{cp} \cdot n_u}{n_p z_1 \cos \beta_{cp}} \text{ мм}^3. \quad (21)$$

Последние пять формул могут быть представлены в виде формулы

$$q = \frac{C_1 n_u}{n_p z_1} \text{ мм}^3, \quad (22)$$

где  $C_1$  — величина, зависящая от вида резьбы, ее шага и среднего диаметра и не зависящая от режимов резания.

Для удобства исследования влияния режимов резания на объем снимаемой стружки, преобразуем формулу (22), подставив в нее значение

$$n_u = \frac{s_z n_p z}{\pi d_0} \text{ об/мин.} \quad (23)$$

где  $s_z$  — подача на резец (в мм);

$d_0$  — наружный диаметр резьбы (в мм).

После подстановки и сокращения и введения значения  $\pi d_0$  в коэффициент  $C$  получим

$$q = C s_z \text{ мм}^3. \quad (24)$$

Из формулы (24) видно, что объем снимаемой при вихревом нарезании резьбы стружки зависит только от параметров нарезаемой резьбы и круговой подачи на резец.

Значения  $C$  для различных резьб определяются из выражений: для метрической резьбы

$$C = 0,325 s^2 \frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}};$$

для дюймовой резьбы

$$C = 0,317 s^2 \frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}};$$

для трапецеидальной резьбы с шагом от 2 до 4 мм

$$C = (0,25 s^2 + 0,09 s) \frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}};$$

для трапецеидальной резьбы с шагом от 5 до 12 мм.

$$C = (0,25 s^2 + 0,18 s) \frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}};$$

для трапецеидальной резьбы с шагом от 16 до 40 мм

$$C = (0,25 s^2 + 0,37 s) \frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}}.$$

Во многих случаях при практических подсчетах величиной отношения  $\frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}}$  можно пренебречь. Для всех треугольных резьб диаметром больше 30 мм вызванная этим ошибка не превышает 7%. Для трапецидальных резьб ошибка может быть значительно большей, и, особенно для крупной трапецидальной резьбы небольшого диаметра, пренебрегать значением  $\frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}}$  не следует.

Значение  $\cos \beta_{cp}$  можно во всех этих случаях принимать равным единице.

В таблице 1 приводятся подсчитанные для некоторых резьб величины  $C$  и показано влияние отношения  $\frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}}$  на эту величину.

Таблица 1

Влияние отношения  $\frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}}$  на значение  $C$ 

Резьба	Величина $C$ с учетом отношения	Величина $C$ без учета отношения	Разность (в %)
	$\frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}}$	$\frac{d_{cp}}{d_0 \cos \beta_{cp}}$	
1 М 24 × 2	1,23		5,8
2 М 36 × 2	1,25		4,0
2 М 52 × 2	1,27	1,3	2,3
3 М 150 × 2	1,29		0,9
3 М 200 × 2	1,293		0,5
М 64 × 6	11,00		6,2
М 72 × 6	11,07		5,7
М 150 × 6	11,38	11,7	2,9
М 200 × 6	11,49		2,0
М 600 × 6	11,63		0,3
трап 30 × 10	22,42		19,5
трап 40 × 10	23,54		14,0
трап 65 × 10	24,60	26,8	9,0
трап 80 × 10	25,14		7,0
трап 200 × 10	26,13		3,0
трап 230 × 10	26,21		2,0
трап 44 × 12	33,1		15,0
трап 60 × 12	34,47		10,5
трап 85 × 12	35,5		7,3
трап 110 × 12	36,0	38,16	6,0
трап 240 × 12	37,16		2,5
трап 300 × 12	37,4		2,0

Из формул, определяющих значение  $C$ , следует, что диаметр нарезаемой резьбы должен оказывать незначительное влияние на объем снимаемой стружки. Это влияние иллюстрируется данными таблицы 2.

Таблица 2

Влияние диаметра нарезаемой резьбы  $d_0$  на значение коэффициента  $C$ 

Вид резьбы	Шаг резьбы $s$ (в мм)	Диаметр резьбы $d_0$ (в мм)	Значение $C$	Увеличение $d_0$ (в %)	Увеличение $C$ (в %)
Метрическая	2	24 : 200	1,23 ÷ 1,293	835	5,0
Метрическая	6	64 : 600	11,00 ÷ 11,63	940	5,7
Трапецидальная	10	30 : 230	22,42 ÷ 26,21	770	16,8
Трапецидальная	12	44 : 300	33,1 ÷ 37,4	680	13,0

Как видно из таблицы 2, влияние диаметра резьбы на величину коэффициента  $C$ , а значит, и на объем снимаемой стружки, невелико.

Влияние шага нарезаемой резьбы на величину коэффициента  $C$  и на объем снимаемой стружки иллюстрируется таблицей 3.

Таблица 3

Влияние шага резьбы  $s$  на величину  $C$  и  $q$  ( $q = C$  при  $s_z = 1$ )

Резьба	$d_0$ (в мм)	$s$ (в мм)	$C$	Резьба	$d_0$ (в мм)	$s$ (в мм)	$C$
5 М 64×1	64	1	0,32	трап 36×3	36	3	2,42
4 М 64×1,5	64	1,5	0,72	трап 36×6	36	6	9,22
3 М 64×2	64	2	1,27	трап 36×10	36	10	23,08
2 М 64×3	64	3	2,84				
1 М 64×4	64	4	4,99				
М 64×6	64	6	10,97				

При увеличении шага резьбы объем стружки резко увеличивается. У треугольных резьб это увеличение несколько большее, чем у трапецидальных.

На основании сказанного выше можно сделать следующие выводы:

1) При нарезании определенной резьбы с постоянной круговой подачей, объем стружки, снимаемой при внешнем и внутреннем касании, будет одинаков, и за равные промежутки времени снимется равное количество одинаковых по объему стружек, т. е. одинаковое количество металла, если пренебречь практически ничтожной разницей в объемах снимаемого металла за счет различия в высоте гребешков, образующихся на обработанной поверхности при внешнем и внутреннем касании.

2) Диаметр резьбы оказывает небольшое влияние на объем стружки. При постоянном шаге увеличение диаметра сопровождается медленным увеличением объема стружки.

3) На объем стружки наибольшее влияние оказывает шаг резьбы.

4) Изменение круговой подачи вызывает пропорциональное изменение объема стружки.

5) При нарезании определенной резьбы объем стружки зависит только от величины круговой подачи.

**УГОЛ КОНТАКТА И ДЛИНА СРЕЗА**

При вихревом нарезании резьбы процесс является прерывистым. На протяжении одного оборота резец только на части своей траектории находится в контакте с изделием. За время контакта с изделием резец снимает стружку объема  $q$  мм<sup>3</sup>. Очевидно, что на процесс резания будет оказывать влияние не только объем снимаемой стружки, но и ее размеры, т. е. соотношение длины, толщины и ширины стружки.

Назовем дуги  $AE$  и  $A'E'$  (рис. 1 и 2), на длине которых резец находится в контакте с изделием при внутреннем и внешнем касании, дугами контакта, а отвечающие им центральные углы  $\omega$  и  $\omega'$  — углами контакта.

Величина угла контакта при внутреннем касании определяется по формуле

$$\omega = \arccos \frac{r_p^2 + a^2 - r_0^2}{2r_p e} + \frac{r_1 \varphi}{r_p \cdot 2}; \tag{25}$$

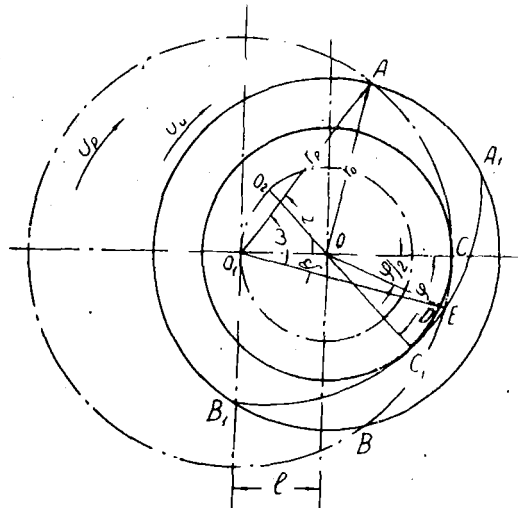


Рис. 1. Схема нарезания резьбы при внутреннем касании.

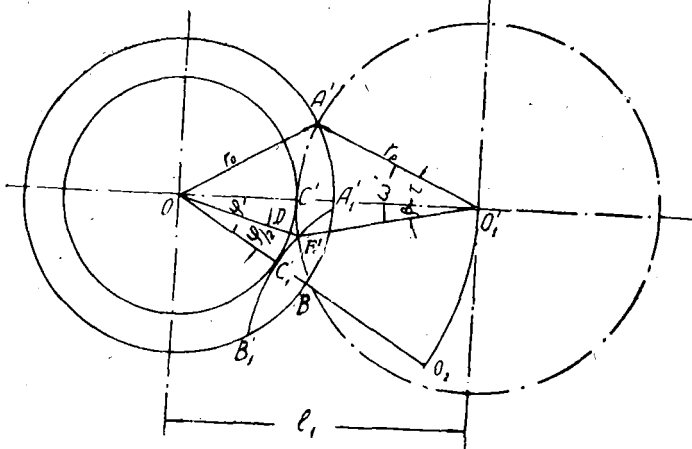


Рис. 2. Схема нарезания резьбы при внешнем касании.

а при внешнем касании:

$$\omega^1 = \arccos \frac{r_p^2 + e^2 - r_0^2}{2r_p e_1} + \frac{r_1}{r_p} \cdot \frac{\varphi}{2}. \quad (26)$$

В этих формулах

$\omega$  — угол контакта при внутреннем касании (в градусах);

$\omega^1$  — угол контакта при внешнем касании (в градусах);

$r_0$  — радиус окружности вершин резцов (в мм).

При внутреннем касании  $r_p > r_0$ , при внешнем касании  $r_p \leq r_0$ ;

$e$  — эксцентриситет при внутреннем касании (в мм);

$r_0$  — наружный радиус резьбы (в мм);

$r_1$  — внутренний радиус резьбы (в мм);

$\varphi$  — угол подачи, соответствующий круговой подаче на один резец

$$\varphi = \frac{360 s_z z_1}{\pi d_0};$$

$e_1$  — расстояние между осями изделия и окружности вершин резцов при внешнем касании

$$e_1 = r_p + r_1.$$

Так как при практически применяемых подачах угол  $\varphi$  очень мал по сравнению с углом контакта, то при расчетах величина  $\frac{r_1}{r_p} \cdot \frac{\varphi}{2}$  может не учитываться.

Длина среза, т. е. длина недеформированной стружки, равная длине дуги контакта, с достаточной точностью может быть определена из выражений

$$l = \frac{\pi r_p}{180} \omega \quad (27)$$

и

$$l^1 = \frac{\pi r_p}{180} \omega^1, \quad (28)$$

где  $l$  — длина среза при внутреннем касании (в мм);

$l^1$  — длина среза при внешнем касании (в мм).

Из формул (25), (26), (27) и (28) следует, что на величину угла контакта и длину дуги контакта (длину среза) оказывают влияние диаметр нарезаемой резьбы  $d_0$ , ее шаг  $s$ , отношение диаметра окружности вершин резцов к диаметру резьбы  $\frac{d_p}{d_0}$  и круговая подача  $s_z$ .

1. Влияние наружного диаметра резьбы  $d_0$  на  $\omega$ ;  $\omega^1$ ;  $l$  и  $l^1$ .

В таблице 4 приведены значения углов контакта  $\omega$  и  $\omega^1$  и длин среза  $l$  и  $l^1$  при внутреннем и внешнем касании для метрической резьбы с шагом  $s = 6$  мм и трапецеидальной резьбы с шагом  $s = 10$  мм при различных диаметрах резьбы.

Влияние диаметра резьбы на  $\omega$ ;  $\omega^1$ ;  $l$  и  $l^1$  показано на рис. 3.

Из таблицы 4 и кривых на рис. 3 видно, что при увеличении диаметра резьбы углы контакта при внешнем и внутреннем касании уменьшаются, а длина срезов увеличивается.



Таблица 4

Углы контакта и длины срезов при внутреннем и внешнем касании в зависимости от диаметра резьбы  $d_0$

Резьба	$d_0$ (в мм)	$s$ (в мм)	$s_z$ (в мм/рез)	$\frac{d_p}{d_0}$	$\omega^0$	$\omega'^0$	$l$ (в мм)	$l'$ (в мм)	$\frac{l}{l'}$
М 64×6	64				51,61	18,70	33,14	12,1	2,74
М 72×6	72				49,69	17,62	35,90	12,72	2,82
М 100×6	100	6	1	1,15	44,89	14,88	44,90	15,02	3,00
М 150×6	150				38,85	12,10	58,40	18,15	3,22
М 200×6	200				34,87	10,29	66,10	20,68	3,35
трап 30×10	30				61,80	33,1	18,59	9,96	1,87
трап 40×10	40				60,21	28,00	24,14	11,23	2,12
трап 65×10	65	10	1	1,15	55,23	21,86	36,03	14,26	2,52
трап 80×10	80				52,71	19,66	42,29	15,77	2,68
трап 200×10	200				39,51	13,43	79,02	26,85	2,94

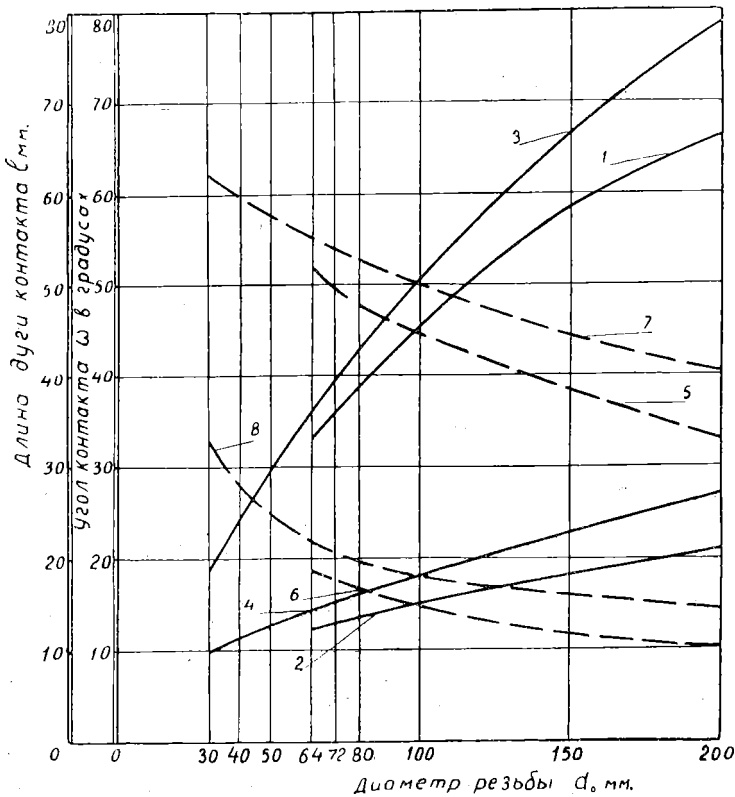


Рис. 3. Влияния диаметра резьбы  $d_0$  на  $\omega$ ;  $\omega'$ ;  $l$  и  $l'$ .

Длины дуг контакта при внутреннем и внешнем касании: 1, 2 — резьба метрическая с шагом 6 мм, 3, 4 — резьба трапецидальная с шагом 10 мм. Величины углов контакта при внутреннем и внешнем касании: 5, 6 — резьба метрическая с шагом 6 мм, 7, 8 — резьба трапецидальная с шагом 10 мм.

Длина среза при внешнем касании значительно меньше длины среза при внутреннем касании. При увеличении диаметра резьбы длина среза при внешнем касании возрастает несколько медленнее, чем при внутреннем касании и разница в этих длинах увеличивается.

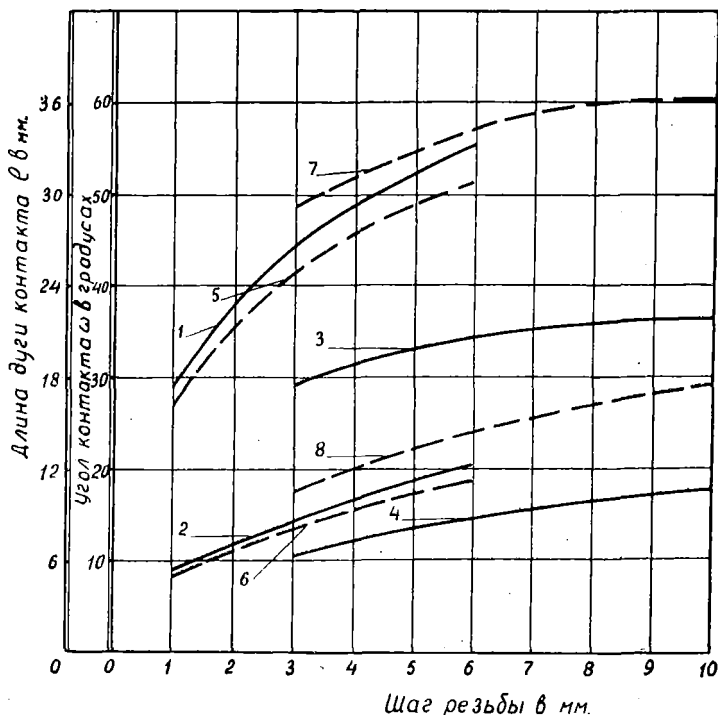


Рис. 4. Влияние шага резьбы  $s$  на  $\omega$ ;  $\omega^1$ ;  $l$  и  $l^1$ .

Длины дуг контакта при внутреннем и внешнем касании: 1, 2 — резьба метрическая  $d_0 = 64$  мм, 3, 4 — резьба трапецидальная  $d_0 = 36$  мм. Углы контакта: 5, 6 — резьба метрическая  $d_0 = 64$  мм, 7, 8 — резьба трапецидальная  $d_0 = 36$  мм.

## 2. Влияние шага резьбы $s$ на $\omega$ ; $\omega^1$ ; $l$ и $l^1$ .

В таблице 5 приведены значения углов контакта  $\omega$  и  $\omega^1$  и длин среза  $l$  и  $l^1$  для метрической резьбы с диаметром  $d_0 = 64$  мм и трапецидальной резьбы с диаметром  $d_0 = 36$  мм при изменении шага резьбы.

По данным таблицы 5 построены кривые на рис. 4.

Из таблицы 5 и кривых на рис. 4 следует, что при постоянном диаметре резьбы увеличение ее шага сопровождается увеличением углов контакта и длин среза, однако это увеличение относительно невелико. Действительно, при увеличении шага метрической резьбы в 6 раз, длина среза  $l$  при внутреннем касании увеличилась только на 91%, а при внешнем касании  $l^1$  в 2,3 раза. При увеличении шага трапецидальной резьбы в 3,3 раза  $l$  увеличилось на 26,5%, а  $l^1$  — на 70%.

Длина среза при внешнем касании значительно меньше, чем при внутреннем, однако при увеличении шага резьбы первая растет быстрее и разница в длинах среза уменьшается.

3. Влияние отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  на  $\omega$ ;  $\omega^1$ ;  $l$  и  $l^1$  характеризуется данными таблицы 6 и кривыми на рис. 5.

Таблица 5

Углы контакта и длины срезов при внутреннем и внешнем касании в зависимости от шага резьбы

Резьба	$d_0$ (в мм)	$S$ (в мм)	$S_z$ (в мм/рез.)	$\frac{d_p}{d_0}$	$\omega^0$	$\omega'^0$	$l$ (в мм)	$l'$ (в мм)	$\frac{l'}{l}$
5М64×1		1			26,95	8,11	17,29	5,21	3,32
4М64×1,5		1,5			31,94	9,74	20,50	6,25	3,28
3М64×2	64	2	1	1,15	35,82	11,15	22,99	7,16	3,21
2М64×3		3			41,58	13,47	26,69	8,62	3,10
1М64×4		4			45,73	15,42	29,36	9,90	2,96
М64×6		6			51,61	18,70	33,14	12,10	2,74
трап 36×3		3			48,82	17,35	17,62	6,26	2,82
трап 36×6	36	6	1	1,15	57,27	23,89	20,70	8,62	2,4
трап 36×10		10			60,57	29,55	21,87	10,67	2,06

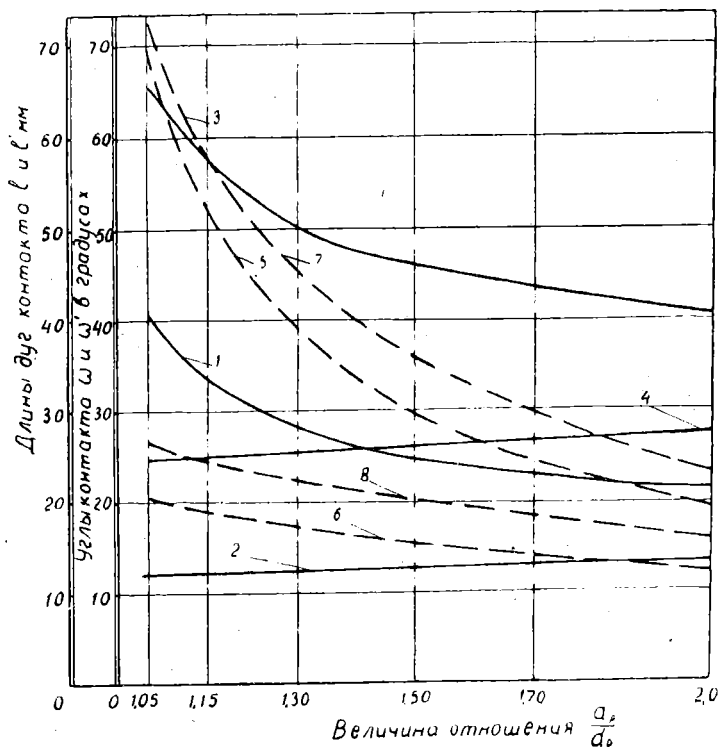


Рис. 5. Влияние отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  на  $\omega$ ;  $\omega'$ ;  $l$  и  $l'$ .

Кривые 1, 2 —  $l$  и  $l'$  для резьбы М64×6; 3, 4 —  $l$  и  $l'$  для резьбы трап 100×20; 5, 6, 7, 8 —  $\omega$  и  $\omega'$  для тех же резьб.

Таблица 6

Влияние отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  на углы контакта и длины срезов при внутреннем и внешнем касании

Резьба	$d_0$ (в мм)	$S$ (в мм)	$S_z$ (в мм/рез.)	$\frac{d_p}{d_0}$	$\omega^0$	$\omega'^0$	$l$ (в мм)	$l'$ (в мм)	$\frac{l}{l'}$
М64×6	64	6	1	1,05	69,30	20,12	40,01	11,79	3,45
				1,15	51,31	18,70	33,14	12,10	2,75
				1,30	38,31	16,96	27,79	12,30	2,26
				1,50	29,21	15,04	24,44	12,58	1,95
				1,70	23,83	13,60	22,62	12,96	1,75
Трап 100×20	100	20	1	1,05	72,40	26,50	66,24	24,24	2,73
				1,15	57,73	24,63	57,90	24,70	2,32
				1,30	45,08	22,30	51,12	25,28	1,98
				1,50	35,35	19,83	46,24	25,94	1,78
				1,70	29,23	17,81	43,35	26,41	1,65
				2,00	23,33	15,50	40,68	27,03	1,51

Из данных таблицы 6 и кривых на рис. 5 следует, что при увеличении отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  углы контакта при внутреннем и внешнем касании уменьшаются, причем при внешнем касании значительно меньше, чем при внутреннем.

В случае внутреннего касания при увеличении отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  длина среза заметно уменьшается. При внешнем касании, наоборот, происходит увеличение длины среза, однако это увеличение невелико. Для резьбы М64×6 при увеличении отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  от 1,05 до 2, т. е. в 1,9 раза, длина среза  $l'$  возросла всего с 11,79 мм до 13,25 мм, т. е. на 13%.

У резьбы трап 100×20 увеличение  $\frac{d_p}{d_0}$  от 1,05 до 2 вызвало увеличение  $l'$  от 24,24 мм до 27,03 мм, т. е. на 11,3%.

Таким образом, увеличение отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  приводит к весьма значительному уменьшению длины среза при внутреннем касании и к относительно небольшому увеличению длины среза при внешнем касании. При увеличении отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  разница между  $l$  и  $l'$  уменьшается.

4. Влияние круговой подачи  $s_z$  на  $\omega$ ;  $\omega^1$   $l$  и  $l^1$ .

Влияние круговой подачи на резец  $s_z$  и на величину углов контакта и длину срезов при внутреннем и внешнем касании иллюстрируется таблицей 7 и кривыми на рис. 6:

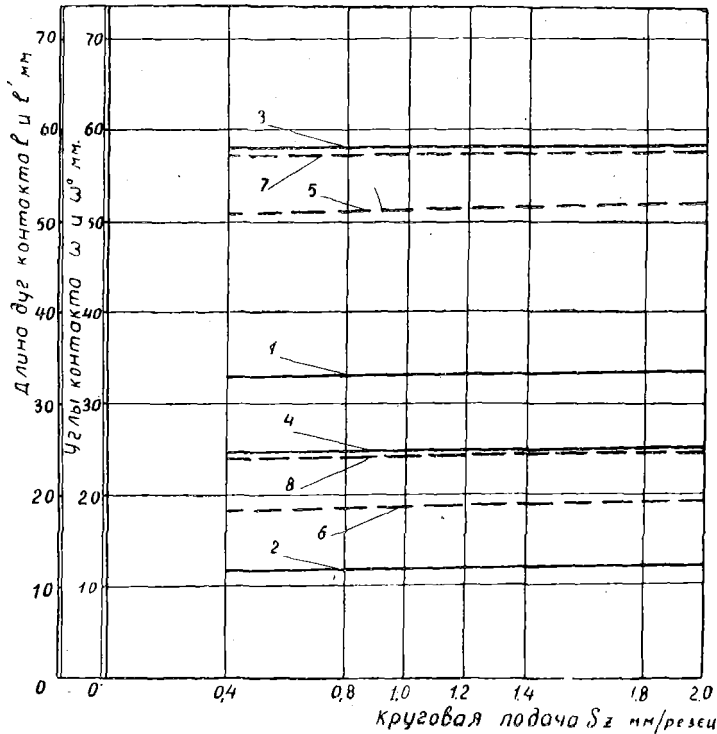


Рис. 6. Влияние круговой подачи  $s_z$  на  $\omega$ ;  $\omega^1$   $l$  и  $l^1$ .

Линии: 1, 2 —  $l$  и  $l^1$  для резьбы М64Х6; 3, 4 —  $l$  и  $l^1$  для резьбы трап 100Х20; 5, 6, 7, 8 —  $\omega$  и  $\omega^1$  для тех же резьб.

Как видно, круговая подача очень незначительно влияет на величины углов контакта и длины срезов при внутреннем и внешнем касаниях. Это следует из формул 25 и 26, так как круговая подача оказывает влияние только на величину угла подачи  $\phi$ , который при практически применяемых подачах очень мал ( $1^\circ \div 4^\circ$ ) и составляет незначительную часть углов контакта  $\omega$  и  $\omega^1$ .

### ВЫВОДЫ

1. Углы контакта и длины срезов при внешнем касании значительно меньше, чем при внутреннем.

2. При увеличении диаметра резьбы определенного шага углы контакта уменьшаются, а длины срезов увеличиваются, разница в длине срезов при внешнем и внутреннем касании также возрастает.

У крупных резьб разница длин срезов меньше, чем у мелких.

Таблица 7

Влияние величины круговой подачи  $s_z$  на углы контакта и длины срезов при внутреннем и внешнем касании

Резьба	$d_0$ (в мм)	$s$ (в мм)	$s_z$ (в мм/рез)	$\frac{d_p}{d_0}$	$\omega^0$	$\omega'^0$	$l$ (в мм)	$l'$ (в мм)	$\frac{l}{l'}$
М64 × 6	64	6	0,4	1,15	50,93	18,30	32,62	11,74	2,78
			0,8		51,20	18,58	32,90	11,92	2,76
			1,0		51,41	18,70	33,00	12,00	2,75
			1,2		51,48	18,85	33,10	12,10	2,74
			1,4		51,61	18,99	33,18	12,20	2,72
			1,8		51,83	19,18	33,25	12,30	2,70
			2,0		52,02	19,31	33,40	12,40	2,69
трап 100 × 20	100	20	0,4	1,15	57,49	24,39	57,67	24,46	2,36
			0,8		57,66	24,55	57,84	24,62	2,35
			1,0		57,73	24,61	57,90	24,68	2,34
			1,2		57,81	24,70	57,99	24,77	2,34
			1,4		57,90	24,78	58,08	24,85	2,33
			1,8		58,05	24,93	58,23	25,00	2,33
			2,0		58,13	25,01	58,31	25,08	2,32

3. Увеличение шага резьбы при постоянном диаметре вызывает увеличение углов контакта и длины срезов, однако разница в длинах срезов при внутреннем и внешнем касании уменьшается.

4. Величина отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  по-разному влияет на углы контакта и длину срезов при внутреннем и внешнем касании.

При внутреннем касании увеличение отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  вызывает значительное уменьшение углов контакта и длины срезов. При внешнем касании — уменьшение углов контакта происходит медленнее, а длина срезов незначительно увеличивается. Разница в этих длинах при этом намного уменьшается.

5. Круговая подача практически не оказывает влияния на величину углов контакта и длину срезов.

#### СРЕДНЯЯ ПЛОЩАДЬ СЕЧЕНИЯ СРЕЗА

Средняя площадь сечения среза  $f_{cp}$  может быть найдена по формуле

$$f_{cp} = \frac{q}{l} \text{ мм}^2, \quad (29)$$

где  $q$  — объем стружки (в  $\text{мм}^3$ );  
 $l$  — длина стружки (в  $\text{мм}$ ).

Очевидно, на  $f_{cp}$  будут оказывать влияние те же факторы, которые влияют на величины  $q$  и  $l$ , т. е. геометрические параметры резьбы, круговая подача и величина отношения  $\frac{d_p}{d_0}$ .

На основании изложенного выше следует, что диаметр резьбы практически не влияет на объем стружки  $q$ , но влияет на ее длину  $l$ . Увеличение диаметра резьбы  $d_0$  приводит к уменьшению  $f_{cp}$ .

Шаг резьбы оказывает большое влияние на объем стружки и значительно меньшее — на ее длину. При увеличении шага резьбы средняя площадь сечения стружки  $f_{cp}$  увеличивается.

Круговая подача практически не влияет на длину стружки, но вызывает пропорциональное увеличение ее объема. Поэтому при увеличении круговой подачи  $f_{cp}$  увеличивается.

Величина отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  не влияет на объем среза, но влияет на его длину. При внутреннем касании увеличение  $\frac{d_p}{d_0}$  сопровождается уменьшением длины среза и увеличением его средней площади, при внешнем касании — наоборот.

Влияние указанных факторов на величину  $f_{cp}$  иллюстрируется таблицей 8.

На основании приведенных выше положений и данных таблицы 8 можно сделать следующие выводы.

1. При внешнем касании средняя площадь сечения среза больше, чем при внутреннем касании.

2. При увеличении диаметра резьбы определенного шага средняя площадь среза значительно уменьшается; при внутреннем касании это уменьшение происходит более интенсивно, что вызывает увеличение разницы между средней площадью среза при внешнем касании  $f'_{cp}$  и при внутреннем касании  $f_{cp}$ .

3. Увеличение шага резьбы при постоянном диаметре сопровождается резким увеличением средней площади среза.

4. Изменение круговой подачи вызывает примерно пропорциональное изменение средней площади среза.

5. При внутреннем касании увеличение отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  вызывает значительное увеличение средней площади среза, при внешнем касании — весьма слабое ее уменьшение. Разница между  $f'_{cp}$  и  $f_{cp}$  значительно уменьшается.

6. Во всех случаях при увеличении шага резьбы разница в средних площадях среза при внешнем и внутреннем касаниях уменьшается.

#### МАКСИМАЛЬНАЯ ТОЛЩИНА СРЕЗА

За время контакта резца с изделием толщина стружки изменяется от нуля до максимума и снова до нуля. Поэтому протекание процесса резания зависит от максимальной толщины среза и характера ее изменения по длине среза.

Максимальная толщина среза при внутреннем касании  $a_{\max}$  определится по формуле:

$$a_{\max} = \sqrt{e^2 + r_0^2 - 2er_0 \cos(\varepsilon + \varphi)} - r_p, \quad (30)$$

Таблица 8

Влияние параметров резьбы, круговой подачи и отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  на среднюю площадь среза

Резьба	$d_0$ (в мм)	$s$ (в мм)	$s_z$ (в мм)	$\frac{d_p}{d_0}$	$q$ (в мм <sup>3</sup> )	$l$ (в мм)	$l'$ (в мм)	$f_{cp}$ (в мм <sup>2</sup> )	$f'_{cp}$ (в мм)	$\frac{f'_{cp}}{f}$
М 64×6	64				10,97	33,14	12,10	0,33	0,91	2,76
М 72×6	72				11,07	35,90	12,72	0,31	0,87	2,80
М 100×6	100	6	1	1,15	11,23	44,90	15,02	0,25	0,75	3,00
М 150×6	150				11,38	58,40	18,15	0,20	0,63	3,14
М 200×6	200				11,49	69,10	20,68	0,17	0,56	3,30
трап 30×10	30				22,42	18,59	9,96	1,21	2,25	1,86
трап 40×10	40				23,54	24,14	11,23	0,98	2,09	2,14
трап 65×10	65	10	1	1,15	24,60	36,03	14,26	0,68	1,73	2,54
трап 80×10	80				25,14	42,29	15,77	0,59	1,59	2,70
трап 200×10	200				26,13	79,02	26,86	0,31	0,97	3,14
5 М 64×1		1			0,32	17,29	5,21	0,02	0,06	3,00
4 М 64×1,5		1,5			0,72	19,57	6,25	0,04	0,12	3,00
3 М 64×2	64	2	1	1,15	1,27	22,99	7,16	0,06	0,18	3,00
2 М 64×3		3			2,84	26,69	8,62	0,11	0,33	3,00
1 М 64×4		4			4,99	29,36	9,90	0,17	0,50	2,96
М 64×6		6			10,97	33,14	12,10	0,33	0,91	2,76
трап 36×3		3			2,42	17,62	6,26	0,14	0,39	2,78
трап 36×6	36	6	1	1,15	9,22	20,70	8,62	0,45	1,07	2,38
трап 36×10		10			23,08	21,87	10,67	1,06	2,16	2,04
М 64×6	64	6		1,15	4,39	32,62	11,74	0,134	0,374	2,79
			0,8		8,78	32,90	11,92	0,267	0,735	2,75
			1,0		10,97	33,00	12,00	0,333	0,915	2,75
			1,2		13,16	33,10	12,10	0,397	1,095	2,75
			1,4		15,36	33,18	12,20	0,464	1,26	2,72
			1,8		19,75	33,75	12,30	0,595	1,61	2,70
			2,0		21,94	33,40	12,40	0,657	1,77	2,69



Продолжение таблицы 8

Резьба	$d_h$ (в мм)	$s$ (в мм)	$S_z$ (в мм)	$\frac{d_p}{d_0}$	$q$ (в мм <sup>3</sup> )	$l$ (в мм)	$l'$ (в мм)	$f_{cp}$ (в мм <sup>2</sup> )	$f'_{cp}$ (в мм <sup>2</sup> )	$\frac{f'_{cp}}{f}$
трап 100×20	100	20	0,4	1,15	38,66	57,67	24,46	0,67	1,58	2,36
					77,33	57,84	24,62	1,34	3,14	2,34
					96,66	57,90	24,68	1,67	3,92	2,34
					115,99	57,99	24,77	2,00	4,69	2,34
					135,32	58,08	24,85	2,33	5,45	2,34
					173,99	58,23	25,00	2,99	6,96	2,33
					193,32	58,31	25,08	3,32	7,72	2,32
М 64×6	64	6	1	1,05	10,97	40,61	11,79	0,27	0,93	3,45
				1,15		33,14	12,10	0,33	0,91	2,76
				1,30		27,79	12,30	0,39	0,89	2,28
				1,50		24,44	12,58	0,45	0,87	1,93
				1,70		22,62	12,96	0,49	0,85	1,73
				2,00		20,95	13,25	0,52	0,83	1,59
трап 100×20	100	20	1	1,05	96,66	66,24	24,24	1,46	3,99	2,74
				1,15		57,90	24,70	1,67	3,92	2,34
				1,30		51,12	25,28	1,89	3,82	2,02
				1,50		46,24	25,94	2,09	3,74	1,79
				1,70		43,35	26,41	2,23	3,66	1,64
				2,00		40,68	27,03	2,38	3,58	1,50

а при внешнем касании

$$a_{\max} = r_p - \sqrt{e_1^2 + r_0^2 - 2 e_1 r_0 \cos(\epsilon' + \varphi)}, \quad (31)$$

где  $a_{\max}$  и  $a'_{\max}$  — максимальные толщины срезов при внутреннем и внешнем касании (в мм).

$$\epsilon = \arccos \frac{e^2 + r_0^2 - r^2 p}{2 e r_0};$$

$$\epsilon' = \arccos \frac{e_1^2 + r_0^2 - r^2 p}{2 e_1 r_0}.$$

Подсчитанные по этим формулам значения  $a_{\max}$  и  $a'_{\max}$  приведены в таблице 9, а влияние различных факторов на их величину показано на рис. 7, 8, 9 и 10.

Таблица 9

Влияние параметров резьбы, круговой подачи и отношения

 $\frac{d_p}{d_0}$  на максимальную толщину среза

Резьба	$d_0$ (в мм)	$s$ (в мм)	$\frac{s_z}{\text{рез}}$ (в мм)	$\frac{d_p}{d_0}$	$a_{\max}$ (в мм)	$a'_{\max}$ (в мм)	$\frac{a'_{\max}}{a_{\max}}$
М 64×6	64				0,206	0,600	2,91
М 72×6	72				0,204	0,595	2,92
М 100×6	100	6	1	1,15	0,162	0,509	3,10
М 150×6	150				0,124	0,392	3,16
М 200×6	200				0,106	0,359	3,38
трап 30×10	30				0,454	0,870	1,92
трап 40×10	40				0,358	0,847	2,36
трап 65×10	65	10	1	1,15	0,262	0,696	2,66
трап 80×10	80				0,223	0,647	2,88
трап 200×10	200				0,135	0,436	3,23
5М 64×1		1			0,073	0,26	3,56
4 М 64×1,5		1,5			0,09	0,298	3,31
3 М 64×2	64	2	1	1,15	0,108	0,351	3,25
2 М 64×3		3			0,135	0,432	3,20
1 М 64×4		4			0,161	0,497	3,09
М 64×6		6			0,206	0,623	3,02
трап 36×3		3			0,179	0,533	2,98
трап 36×6	36	6	1	1,15	0,28	0,744	2,66
трап 36×10		10			0,38	0,873	2,30
			0,4		0,083	0,292	3,52
			0,8		0,167	0,492	2,95
			1,0		0,212	0,623	2,93
М 64×6	64	6	1,2	1,15	0,248	0,726	2,92
			1,4		0,289	0,836	2,90
			1,8		0,370	1,062	2,88
			2,0		0,410	1,178	2,87

Продолжение таблицы 9

Резьба	$d_0$ (в мм)	$s$ (в мм)	$S_z$ (в мм/ рез.)	$\frac{d_p}{d_0}$	$a_{\max}$ (в мм)	$a'_{\max}$ (в мм)	$\frac{a'_{\max}}{a_{\max}}$
трап 100×20	100	20	0,4	1,15	0,119	0,333	2,80
			0,8		0,247	0,628	2,54
			1,0		0,313	0,781	2,49
			1,2		0,376	0,935	2,48
			1,4		0,439	1,088	2,47
			1,8		0,565	1,397	2,47
			2,0		0,628	1,552	2,47
М 64×6	64	6	1	1,05	0,170	0,618	3,64
				1,15	0,206	0,600	2,91
				1,30	0,251	0,595	2,37
				1,50	0,291	0,579	1,99
				1,70	0,318	0,563	1,77
				2,0	0,343	0,509	1,48
трап 100×20	100	20	1	1,05	0,253	0,799	3,16
				1,15	0,313	0,781	2,50
				1,30	0,366	0,778	2,22
				1,50	0,413	0,765	1,85
				1,70	0,446	0,729	1,63
				2,00	0,493	0,723	1,42

## ВЫВОДЫ

1. При увеличении диаметра резьбы определенного шага максимальная толщина среза уменьшается.

2. При увеличении шага резьбы и круговой подачи максимальная толщина среза увеличивается.

3. Увеличение отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  сопровождается значительным увеличением максимальной толщины среза при внутреннем касании и незначительным уменьшением — при внешнем касании.

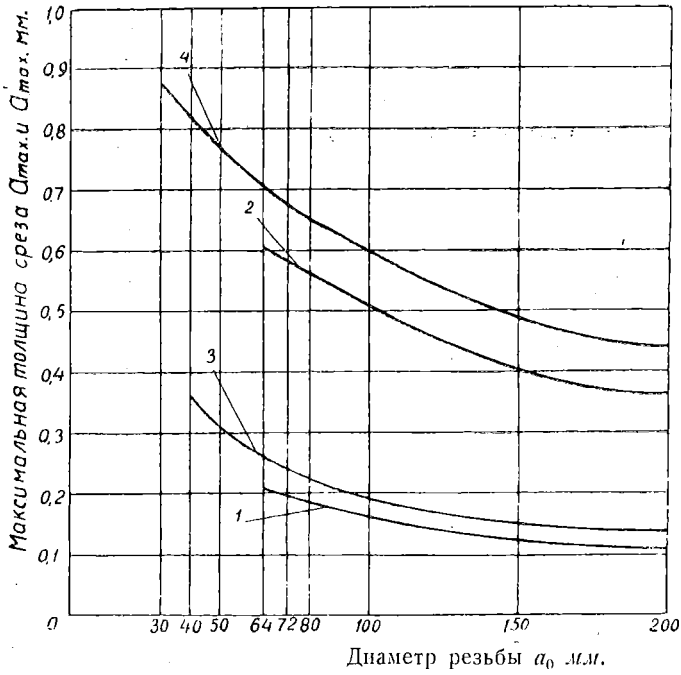


Рис. 7. Влияние диаметра резьбы  $d_0$  на  $a_{max}$  и  $a'_{max}$ .

Кривые 1, 2 —  $a_{max}$  и  $a'_{max}$  для метрической резьбы с шагом 6 мм; 3, 4 —  $a_{max}$  и  $a'_{max}$  для трапецидальной резьбы с шагом 10 мм.

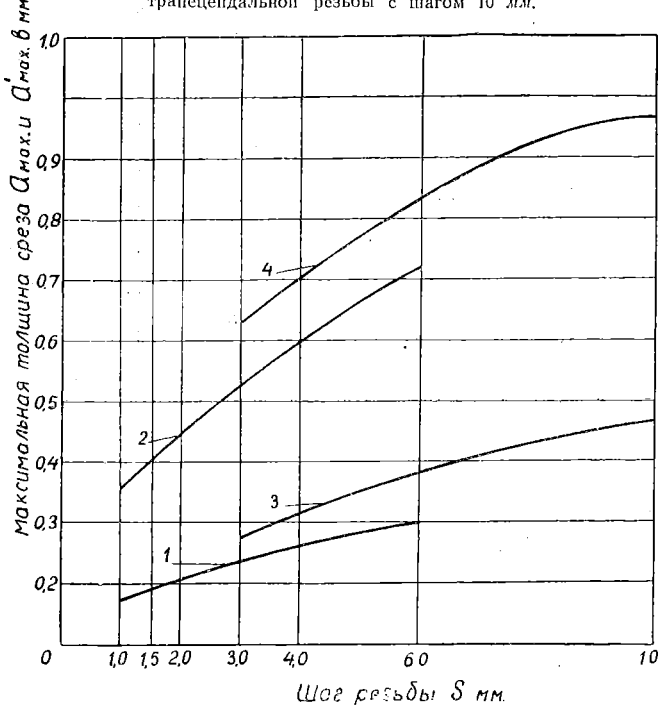


Рис. 8. Влияние шага резьбы  $s$  на  $a_{max}$  и  $a'_{max}$ .

Кривые: 1, 2 —  $a_{max}$  и  $a'_{max}$  для метрической резьбы  $d_0 = 64$  мм; 3, 4 —  $a_{max}$  и  $a'_{max}$  для трапецидальной резьбы  $d_0 = 36$  мм.

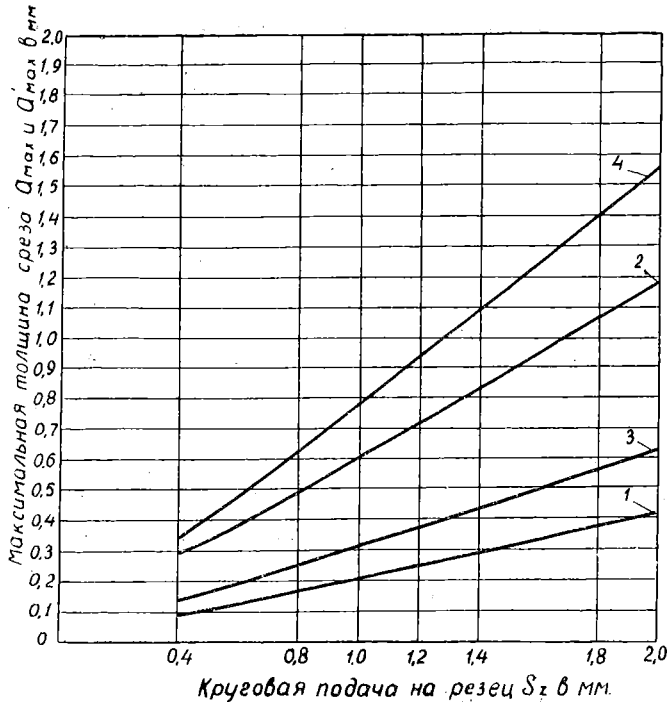


Рис. 9. Влияние круговой подачи  $S_z$  на  $a_{max}$  и  $a'_{max}$ .

Кривые: 1, 2 —  $a_{max}$  и  $a'_{max}$  для резьбы М64×6; 3, 4 —  $a_{max}$  и  $a'_{max}$  для резьбы трап 100×20.

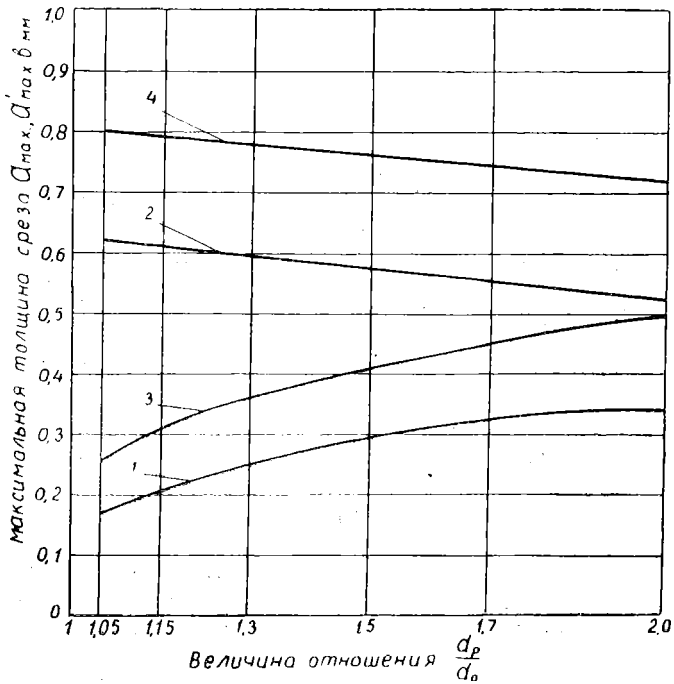


Рис. 10. Влияние  $\frac{d_p}{d_0}$  на  $a_{max}$  и  $a'_{max}$ .

Кривые 1, 2 —  $a_{max}$  и  $a'_{max}$  для резьбы М64×6; 3, 4 —  $a_{max}$  и  $a'_{max}$  для резьбы трап 100×20.

### ВЫСОТА ГРЕБЕШКОВ НА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При любой схеме касания обработанная вращающимися резцами поверхность получается волнистой. Высота гребешков волн, определяемая при внутреннем касании как разность отрезков  $OE$  и  $OD$  (рис. 1), а при внешнем касании —  $OE'$  и  $OD'$  (рис. 2) может быть найдена по формулам

$$h = \sqrt{r_p^2 - l^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}} - \left( l \cos \frac{\varphi}{2} + r_1 \right); \quad (32)$$

$$h' = \left( l_1 \cos \frac{\varphi}{2} - r_1 \right) - \sqrt{r_o^2 - l_1^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad (33)$$

где  $h$  — высота гребешков на дне впадины при внутреннем касании (в мм);

$h'$  — высота гребешков на дне впадины при внешнем касании (в мм).

Высота гребешков на боковой поверхности резцы определяется из выражения

$$h_\sigma = h \sin \frac{\alpha}{2},$$

где  $\alpha$  — угол профиля резцы.

В таблице 10 приводятся значения  $h_\sigma$  и  $h'_\sigma$  для некоторых резцов.

На основании данных таблицы 10 можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении диаметра резцы высота гребешков при внешнем и внутреннем касании уменьшается.

2. С увеличением шага резцы высота гребешков при внутреннем касании несколько возрастает, а при внешнем — уменьшается.

3. Во время нарезания определенной резцы увеличение круговой подачи сопровождается резким увеличением высоты гребешков при внутреннем и внешнем касаниях.

4. Увеличение отношения  $\frac{d_p}{d_o}$  при внутреннем касании сопровождается значительным увеличением высоты гребешков, а при внешнем касании — относительно небольшим уменьшением их высоты.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие общие выводы.

### ВЫВОДЫ

1. При нарезании одной резцы на одинаковых режимах объем стружки при внутреннем и внешнем касаниях практически одинаков. Диаметр резцы незначительно влияет на объем стружки. Увеличение шага резцы сопровождается резким увеличением ее объема. При нарезании определенной резцы объем стружки зависит только от величины круговой подачи.

2. При внешнем касании длина среза значительно меньше, а средняя площадь и максимальная толщина значительно больше, чем при внутреннем.

Таблица 10

**Высота гребешков волн на боковой поверхности резьбы  
при внутреннем и внешнем касании**

Резьба	$d_0$ (в мм)	$s$ (в мм)	$s_z$ (в мм/ рез.)	$\frac{dp}{d_0}$	$h_{\sigma}$ (в микронах)	$h'_{\sigma}$ (в микронах)	$\frac{h'_{\sigma}}{h_{\sigma}}$
М 64×6	64				0,412	3,145	7,41
М 72×6	72				0,365	2,725	7,46
М 100×6	100	6	1	1,15	0,215	2,060	9,58
М 150×6	150				0,152	1,626	10,69
М 200×6	200				0,085	1,095	12,88
5 М 64×1		1,0			0,277	3,711	13,39
4 М 64×1,5		1,5			0,296	3,630	12,26
3 М 64×2	64	2,0	1	1,15	0,301	3,560	11,82
2 М 64×3		3,0			0,330	3,484	10,55
1 М 64×4		4,0			0,354	3,378	9,54
М 64×6		6,0			0,412	3,145	7,45
трап 36×3		3			0,379	2,860	7,54
трап 36×6	36	6	1	1,15	0,445	2,684	6,03
трап 36×10		10			0,504	1,968	3,90
				1,05	0,275	3,30	12
				1,15	0,50	3,10	6,2
М 64×6	64	6	1	1,30	0,64	2,95	5,5
				1,50	0,74	2,80	3,8
				1,70	0,81	2,7	3,33
				2,0	0,9	2,57	2,86

3. Увеличение диаметра резьбы вызывает уменьшение углов контакта и увеличение длины среза, вследствие чего средняя площадь и максимальная толщина среза уменьшаются. Поэтому при увеличении диаметра резьбы определенного шага процесс резания должен протекать более спокойно, с меньшими ударами и вибрациями. Однако при этом время контакта реза с изделием увеличивается и условия врезания реза ухудшаются.

4. При увеличении круговой подачи углы контакта и длины срезов увеличиваются, но в меньшей степени, чем возрастает объем стружки. Поэтому средняя площадь среза и его максимальная толщина увеличиваются.

5. Круговая подача практически не оказывает влияния на величину углов контакта и длину срезов, но вызывает пропорциональное изменение объема стружки. Поэтому увеличение круговой подачи сопровождается примерно пропорциональным увеличением средней площади и максимальной толщины среза.

6. Величина отношения  $\frac{d_p}{d_0}$  не влияет на объем стружки, но оказывает значительное влияние на параметры среза. При внутреннем касании увеличение  $\frac{d_p}{d_0}$  вызывает значительное уменьшение угла контакта и длины среза и значительное увеличение его средней площади и толщины. При внешнем касании увеличение  $\frac{d_p}{d_0}$  вызывает незначительное увеличение угла контакта и длины среза и незначительное уменьшение его средней площади и толщины.

Если  $\frac{d_p}{d_0}$  оказывает заметное влияние на процесс резания при внутреннем касании, то при внешнем касании это влияние должно быть незначительным.

7. Высота гребешков на боковой поверхности резьбы при внешнем касании значительно больше, чем при внутреннем, однако можно подобрать такие режимы резания, при которых чистота поверхности резьбы и в случае нарезания методом внешнего касания будет хорошей.

8. При увеличении диаметра резьбы и ее шага условия резания и чистота поверхности при внешнем касании улучшаются.

Это весьма важно, так как резьбы с большим шагом и червяки практически невозможно нарезать при внутреннем касании из-за необходимости наклона резцовой головки на большой угол.