

УДК 674.023

**В. В. Глебов**, аспирант (УГЛТУ, Россия);**И. Т. Глебов**, кандидат технических наук, доцент, профессор (УГЛТУ, Россия)**ТОЛЩИНА СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ И ПИЛЕНИИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В статье приведены формулы для расчета толщины срезаемого слоя при фрезеровании и пилении массивной древесины и древесных материалов. Современные методы расчета средней толщины срезаемого слоя не точны и не позволяют определить значение средней толщины при угле контакта в диапазоне  $90 \dots 180^\circ$ . Показано, что средняя толщина срезаемого слоя расположена не на середине длины дуги контакта лезвия режущего инструмента с обрабатываемым материалом. Предложенная формула справедлива как для расчета процесса фрезерования, так и для расчета процесса пиления. Полученные формулы позволяют повысить точность расчета и делают процесс расчета единообразным. Формулы будут полезны при проектировании процессов раскроя плитных материалов на станках с ЧПУ концевыми фрезами или круглыми пилами.

In the article the derivation formulas for the calculation of the thickness of the layer being cut at a mill-act and sawing of wood and wooden materials. Modern methods of calculation of the average thickness of the layer being cut are close and not allow us to determine the importance of increasing of average thickness, with angle of contact in the range of  $180^\circ \dots 90^\circ$ . It is shown that the average thickness of the layer being cut is not located in the middle of the length of the arc of contact of the blade cutting tool with the material processed. The proposed formula holds for calculating the process of milling and calculation process cutting. The obtained formulae allow to increase the accuracy of calculations and make the process of calculation of the uniform. The formula will be useful in project design processes of cutting of materials on CNC end milling cutters or circular saws.

**Введение.** При выборе режимов пиления и фрезерования кромок плитных материалов (фанеры, древесностружечных плит) и древесины основным расчетным параметром является толщина срезаемого слоя, от величины которой зависят производительность и точность процесса, шероховатость и силы резания. Поскольку толщина срезаемого слоя при цилиндрическом фрезеровании и пилении круглыми пилами переменна, то в расчетах используют значение средней толщины срезаемого слоя, точность определения которой неудовлетворительна.

**Основная часть. При цилиндрическом фрезеровании** различают такие параметры, как глубина фрезерования  $t$  (рис. 1), угол контакта  $\varphi_k$ , толщина срезаемого слоя мгновенная  $a$  (в любой точке дуги контакта  $l_k$ ), средняя  $a_c$ , конечная  $a_{\max}$  (в конце дуги контакта при выходе лезвия из заготовки).

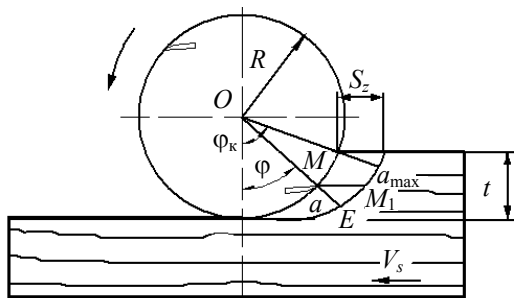


Рис. 1. Схема цилиндрического фрезерования

В настоящее время мгновенное значение толщины срезаемого слоя на дуге контакта находят по формуле Фишера, мм [1]:

$$a = S_z \cdot \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $S_z$  – величина подачи на зуб фрезы, мм;  $\varphi$  – мгновенный центральный угол контакта.

Поскольку мгновенная толщина срезаемого слоя на дуге контакта непрерывно изменяется по величине (от нуля в момент влезания зуба фрезы в обрабатываемый материал до максимального значения в момент выхода зуба из материала), то в расчетах пользуются средним значением толщины срезаемого слоя на дуге контакта.

Считается, что значение средней толщины срезаемого слоя расположено на середине дуги контакта.

Его величина находится при небольших значениях глубины фрезерования [2] так:

$$a_c = S_z \sqrt{\frac{t}{D}}, \quad (2)$$

где  $t$  – глубина фрезерования, мм;  $D$  – диаметр окружности резания фрезы, мм.

При глубине фрезерования  $t = D$  средняя толщина возникает при угле поворота  $40^\circ$  на дуге контакта [3]

$$a_c = 0,64 S_z. \quad (3)$$

При этом остается неизвестным, как изменяется толщина срезаемого слоя при углах контакта в диапазоне  $45 \dots 180^\circ$ .

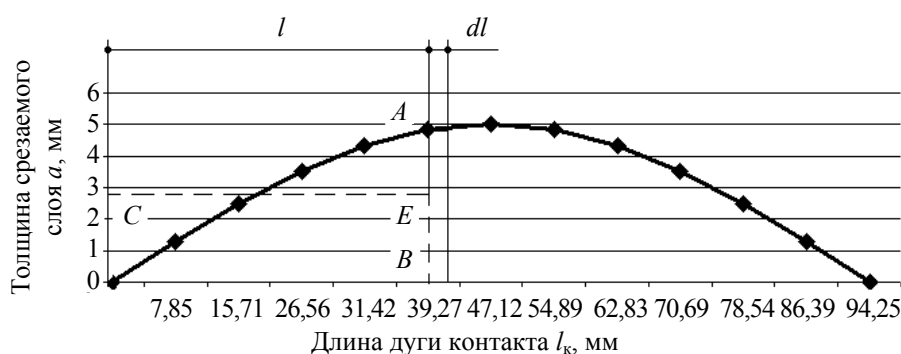


Рис. 2. Изменение мгновенного значения толщины срезаемого слоя на дуге контакта

Излагаемое ниже исследование выполнено с целью получения более точных данных для определения средней толщины срезаемого слоя при цилиндрическом фрезеровании.

Для исследования возьмем цилиндрическую фрезу диаметром  $D = 60$  мм, работающую с подачей на зуб  $S_z = 5$  мм. Максимально возможный при фрезеровании угол контакта  $\varphi_k = \pi = 180^\circ$  поделим на равные участки с шагом  $15^\circ$ . Длина дуги контакта, мм,

$$l_k = R\varphi_k, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус фрезы, мм.

Мгновенное значение толщины срезаемого слоя для каждого участка угла контакта (дуги контакта) найдем по формуле (1).

В осях координат: толщина срезаемого слоя и длина дуги контакта построим график изменения толщины срезаемого слоя (рис. 2).

Кривая зависимости – синусоида. Максимальное значение  $a = 5$  мм имеет при угле контакта  $90^\circ = \pi/2$  рад.

Для определения среднего значения толщины срезаемого слоя  $a_c$ , например, на участке дуги контакта  $OB$ , поступаем так. Находим площадь  $OAB$  под синусоидой на участке  $OB$  и приравняем ее к площади прямоугольника  $OCEB$ , высота которого равна  $a_c$ .

Найдем площадь под всей синусоидой. Для этого на расстоянии  $l$  от начала координат выделим элементарную площадку  $dl$  вы-

сотою  $AB = S_z \sin \varphi$ . Площадь выделенного участка

$$dS = S_z \sin \frac{l}{R} dl.$$

Площадь под синусоидой равна

$$\begin{aligned} S &= S_z \int_{l_k}^0 \sin \frac{l}{R} dl = S_z \int_{l_k}^0 \sin \frac{l}{R} dl \frac{R}{R} = \\ &= S_z R \int_{l_k}^0 \sin \frac{l}{R} d \frac{l}{R}. \end{aligned}$$

$$S = S_z R (1 - \cos \frac{l_k}{R}). \quad (5)$$

Тогда среднее значение толщины срезаемого слоя на участке длиной  $l_k$  будет равно

$$\begin{aligned} a_c &= \frac{S_z R}{l_k} (1 - \cos \frac{l_k}{R}) = \\ &= \frac{S_z}{(\varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}})} (\cos \varphi_{\text{вх}} - \cos \varphi_{\text{вых}}), \quad (6) \end{aligned}$$

где  $\varphi_{\text{вх}}$  и  $\varphi_{\text{вых}}$  – центральные углы входа и выхода лезвия из заготовки, рад.

Изменение толщины срезаемого слоя (мгновенной  $a$  и средней  $a_c$ ) показано в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

#### Результаты расчетов значений $a_c$

$t$ , мм	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\varphi_k$ , рад	0,84	1,05	1,23	1,40	1,57	1,74	1,91	2,09	2,30	2,56	3,14
$l_k$ , мм	25,23	31,42	36,93	42,10	47,12	52,15	57,32	62,83	69,02	76,68	94,25
$a$ , мм	3,73	4,33	4,71	4,93	5,00	4,93	4,71	4,33	3,73	2,76	0,00
$a_c$ , мм	1,98	2,39	2,71	2,97	3,18	3,36	3,49	3,58	3,62	3,59	3,18
$a_c / a$	0,53	0,55	0,57	0,60	0,64	0,68	0,74	0,83	0,97	1,30	–
$\varphi_{ac}$ , рад.	0,41	0,50	0,57	0,64	0,69	0,74	0,77	0,80	0,81	0,80	0,69
$\varphi_{ac}$ , град.	23,3	28,5	32,8	36,4	39,5	42,2	44,3	45,7	46,4	45,8	39,5
$\varphi_{ac} / \varphi_k$	0,48	0,48	0,46	0,45	0,44	0,42	0,40	0,38	0,35	0,31	0,22

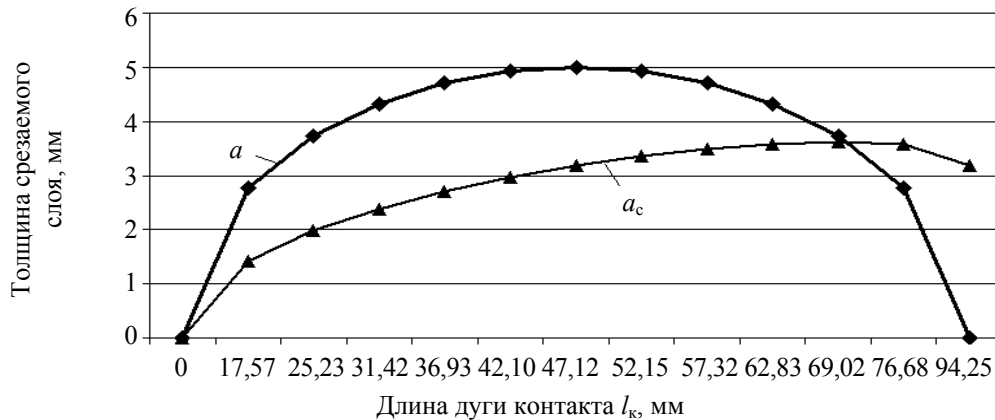


Рис. 3. Изменение толщины срезаемого слоя на дуге контакта

В табл. 1 приведен алгоритм решения задачи по определению средней толщины срезаемого слоя и результаты расчетов с использованием формулы (6). В расчетах принято  $S_z = 5$  мм; радиус фрезы  $R = 30$  мм.

Параметры таблицы получены так:

$t$  – глубина фрезерования, мм, задана произвольно;  $\varphi_k$  – угол контакта, рад:

$$\varphi_k = \arccos\left(\frac{R-t}{R}\right); \quad (7)$$

$l_k$  – длина дуги контакта, мм:  $l_k = R\varphi_k$ ;  $a$  – мгновенное значение толщины срезаемого слоя на дуге контакта, мм:  $a = S_z \sin \varphi_k$ ;  $a_c$  – среднее значение толщины срезаемого слоя на дуге контакта, мм, найдено по формуле (6);  $\varphi_{ac}$  – центральный угол контакта, при котором толщина срезаемого слоя достигает среднего значения на дуге контакта, рад:

$$\varphi_{ac} = \arcsin\left(\frac{\cos \varphi_{вх} - \cos \varphi_{вых}}{\varphi_{вых} - \varphi_{вх}}\right), \quad (8)$$

Анализируя табл. 1, можно сделать следующие выводы.

1. Мгновенное значение толщины срезаемого слоя  $a$  на дуге контакта увеличивается и достигает максимума при угле поворота фрезы на угол  $90^\circ$  ( $\pi/2$  рад.). При дальнейшем повороте фрезы значение толщины срезаемого слоя убывает до нуля (при угле поворота  $180^\circ$ ).

2. Среднее значение толщины срезаемого слоя на дуге контакта определяется по формуле (6). С увеличением дуги контакта до  $146,7^\circ$  ( $2,56$  рад) значение  $a_c$  постоянно растет с замедленным темпом и, наконец, падает до  $a_c = 3,18$  мм.

3. Если глубина фрезерования  $t = 10$  мм, то мгновенная толщина срезаемого слоя достигает максимума на выходе и равна  $a = 3,73$  мм,  $a_c = 1,98$  мм. Отношение  $a_c/a = 0,53$ . Можно

принять, что средняя толщина срезаемого слоя примерно равна половине максимальной. Так принято в современной теории фрезерования. Но такое положение справедливо только для тонких глубин фрезерования. В остальных случаях отношение  $a_c/a > 0,6$ , и поэтому недопустимо принимать  $a_c = 0,5a$ .

4. Точку расположения средней толщины срезаемого слоя  $a_c$  на дуге контакта можно установить по отношению  $\varphi_{ac}/\varphi_k$ , которое непрерывно убывает от 0,48 до 0,22. Это означает, что  $a_c$  достигает своего значения на первой половине дуги контакта. В этой точке дуги контакта следует прикладывать расчетные силы резания, скорость главного движения. Угол контакта средней толщины срезаемого слоя непрерывно растет от  $23,3^\circ$  до  $45,8^\circ$  и, наконец, падает до  $39,5^\circ$ . При продольном фрезеровании древесины указанные углы будут углами перерезания волокон древесины. Их значения находятся по формуле (8).

5. С изменением радиуса фрезы или подачи на зуб характер зависимостей остается прежним. Изложенный метод определения средней толщины срезаемого слоя можно применить к процессу пиления древесины и древесных материалов круглыми пилами (рис. 4).

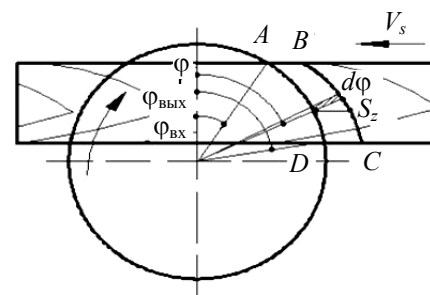


Рис. 4. Схема изменения толщины срезаемого слоя при пилении круглой пилой

Таблица 2

## Результаты расчета примера

$S_z$	мм	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$t$	мм	2	3	4	5	6
$D$	мм	6	6	6	6	6
$\varphi_{\text{вход}}$	рад	0	0	0	0	0
$\varphi_{\text{выход}}$	рад	1,49	1,57	1,65	1,74	1,82
$a_c$		0,44	0,50	0,55	0,60	0,64
$\varphi_{\text{ас}}$	рад	0,664038	0,690107	0,714035	0,735793	0,755295
$\varphi_{\text{ас}}$	град	38,0	39,5	40,9	42,2	43,3

Каждый зуб пилы срезает слой древесины  $ABCD$ . Толщина этого слоя в любой точке траектории измеряется по направлению радиуса в этой точке и определяется по формуле

$$a = S_z \sin \varphi,$$

где  $S_z$  – подача на один зуб, мм;  $\varphi$  – угол поворота пилы в выбранной точке траектории.

В срезанном слое выделим элементарную площадку шириной  $d\varphi$  и высотой  $a$ . Элементарная площадь  $dS = S_z \sin \varphi \cdot d\varphi$ .

Площадь срезанного слоя

$$S = S_z \int_{\varphi_{\text{вх}}}^{\varphi_{\text{вых}}} \sin \varphi \cdot d\varphi = S_z (\cos \varphi_{\text{вх}} - \cos \varphi_{\text{вых}}).$$

Средняя толщина срезанного слоя, мм,

$$a_c = \frac{S_z}{(\varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}})} (\cos \varphi_{\text{вх}} - \cos \varphi_{\text{вых}}). \quad (9)$$

Формула (9) является общей как для пиления, так и фрезерования.

**Заключение.** *Пример.* Дано: на фрезерном станке с ЧПУ обрабатывается кромка фанеры

концевой фрезой диаметром  $D = 6$  мм, с подачей на зуб  $S_z = 0,5$  мм при глубине фрезерования  $t = 2 \dots 6$  мм.

Определить среднюю толщину срезанного слоя и угол контакта, при котором эта толщина будет иметь значение. Порядок расчета сведен в табл. 2. Углы входа лезвия фрезы в заготовку и выхода определены по формуле (7), средняя толщина срезанного слоя  $a_c$  – по формуле (9), центральный угол контакта  $\varphi_{\text{ас}}$ , при котором толщина срезанного слоя достигает среднего значения на дуге контакта, – (8)

В точке дуги контакта с центральным углом  $\varphi_{\text{ас}}$  должны прикладываться средние силы резания.

## Литература

1. Fischer. Die Werkzeugmaschine. 1900. 16 s.
2. Ивановский Е. Г. Резание древесины / М.: Лесная пром-сть, 1975. 200 с.
3. Глебов И. Т. Резание древесины. СПб.: Лань, 2010. 256 с.

Поступила 21.02.2014