

УДК 674.023

В.В. Глебов – аспирант (УГЛТУ, г. Екатеринбург, Россия)**И.Т. Глебов** – доцент, канд. техн. наук, профессор
(УГЛТУ, г. Екатеринбург, Россия)**ТОЛЩИНА СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ
И ПИЛЕНИИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В статье приведен вывод формул для расчета толщины срезаемого слоя при фрезеровании и пилении массивной древесины и древесных материалов. Современные методы расчета средней толщины срезаемого слоя приближены и не позволяют определить значение средней толщины при угле контакта в диапазоне $90^\circ \dots 180^\circ$. 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.

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 не удовлетворительна.

При цилиндрическом фрезеровании различают такие параметры как глубина фрезерования t (рис. 1), угол контакта φ_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). В настоящее время мгновенное значение толщины срезаемого слоя на дуге контакта находят по формуле Фишера, мм [1, с. 8]:

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

где S_z – величина подачи на зуб фрезы, мм;

φ – 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.

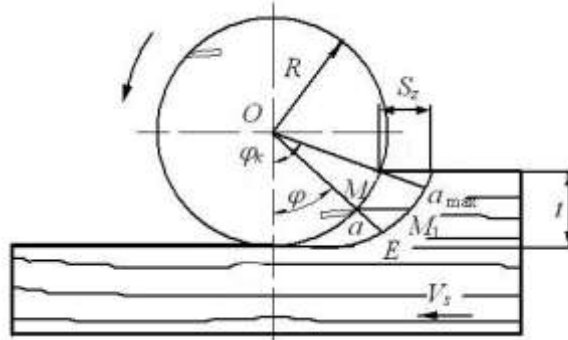


Рис. 1. Схема цилиндрического фрезерования

Его величина находится при небольших значениях глубины фрезерования [2, с. 162] 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° на дуге контакта [3, с. 225]

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

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

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° . 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 $90^\circ = \pi/2$ радиан.

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 приравниваем ее к площади прямоугольника $OCEB$, высота которого равна a_c .

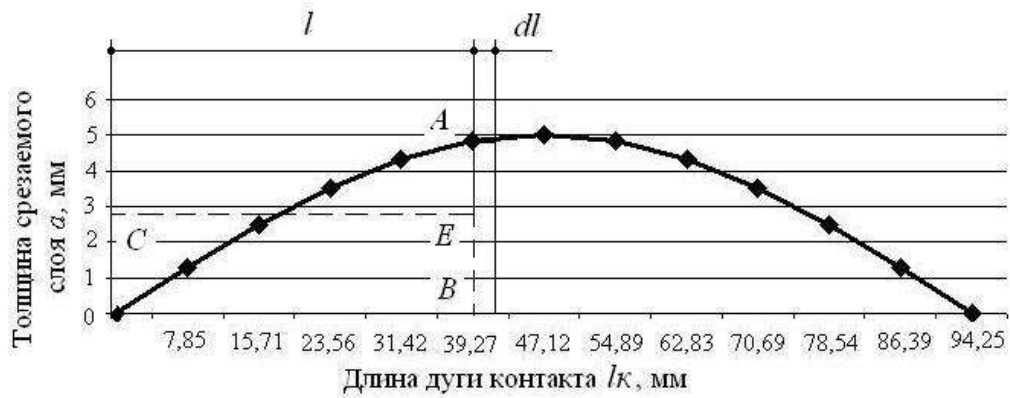


Рис. 2. Изменение мгновенного значения толщины срезаемого слоя на дуге контакта

Найдем площадь под всей синусоидой [4, с. 129]. Для этого на расстоянии l от начала координат выделим элементарную площадку dl высотой $AB = S_z \sin \varphi$. Площадь выделенного участка равна

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

Площадь под синусоидой равна

$$\begin{aligned} S &= S_z \int_{l_k}^0 \sin \frac{l}{R} dl = S_z \int_{l_k}^0 \sin \frac{l}{R} dl \frac{R}{R} = \\ &= S_z R \int_{l_k}^0 \sin \frac{l}{R} d \frac{l}{R}. \\ S &= S_z R (1 - \cos \frac{l_k}{R}). \end{aligned} \quad (5)$$

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

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

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

Изменение толщины срезаемого слоя (мгновенной a и средней a_c) показано в прилагаемой таблице и на рис. 3.

В таблице 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;

φ_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).

φ_{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 таблицу 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° ($\pi/2$ рад.). При дальнейшем повороте фрезы значение толщины срезаемого слоя убывает до нуля (при угле поворота 180°).

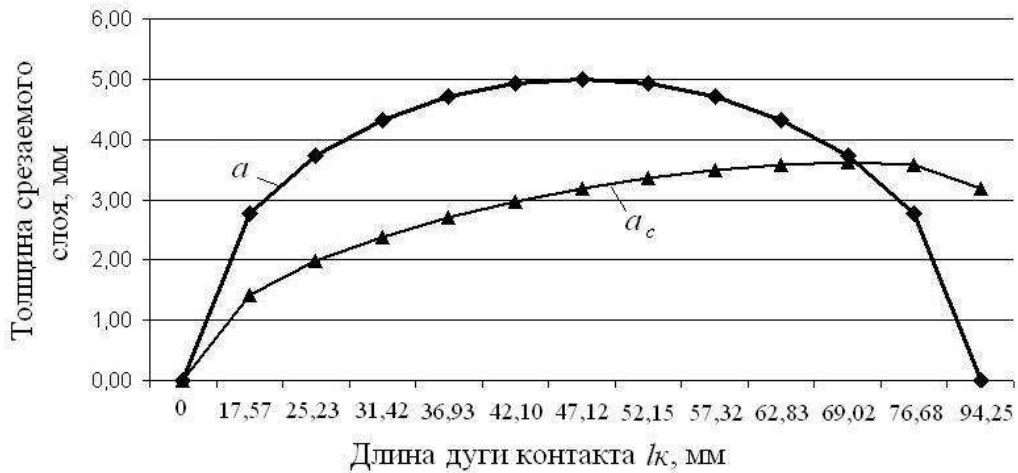


Рис. 3. Изменение толщины срезаемого слоя на дуге контакта

Таблица 1

Результаты расчетов значений a_c

t, мм	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
φ_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	-
φ_{ac} , рад.	0,41	0,50	0,57	0,64	0,69	0,74	0,77	0,80	0,81	0,80	0,69
φ_{ac} , град.	23,3	28,5	32,8	36,4	39,5	42,2	44,3	45,7	46,4	45,8	39,5
φ_{ac} / φ_k	0,48	0,48	0,46	0,45	0,44	0,42	0,40	0,38	0,35	0,31	0,22

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 φ_{ac} / φ_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.

Средняя толщина срезаемого слоя

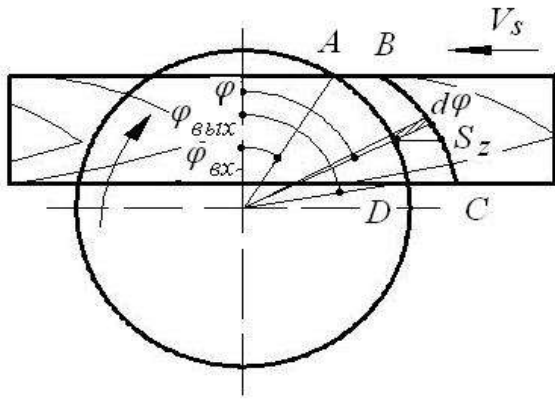


Рис. 4. Схема изменения толщины срезаемого слоя при пилении круглой пилой

В срезаемом слое выделим элементарную площадку шириной $d\varphi$ и высотой a . Элементарная площадь

$$dS = S_z \sin \varphi \cdot d\varphi.$$

Площадь срезаемого слоя

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

при пилении. Изложенный метод определения средней толщины срезаемого слоя можно применить к процессу пиления древесины и древесных материалов круглыми пилами (рис. 4).

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;

φ – угол поворота пилы в выбранной точке траектории.

Средняя толщина срезаемого 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.

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 срезаемого слоя и угол контакта, при котором эта толщина будет иметь значение. Порядок расчета сведен в таблицу 2. Углы входа лезвия фрезы в заготовку и выхода определены по формуле (7), средняя толщина срезаемого слоя a_c – по формуле (9), центральный угол контакта φ_{ac} , при котором толщина срезаемого слоя достигает среднего значения на дуге контакта – (8).

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

φ_{ac}	рад	0,664038	0,690107	0,714035	0,735793	0,755295
φ_{ac}	град	38,0	39,5	40,9	42,2	43,3

В точке дуги контакта с центральным углом φ_{ac} должны прикладываться средние силы резания.

Библиографический список

1. Fischer. Die Werkzeugmaschine. – 1900, 16 s.
2. Ивановский, Е.Г. Резание древесины / Е.Г. Ивановский. – М.: Лесн. пром-сть, 1975. – 200 с.
3. Глебов, И.Т. Резание древесины/ И.Т. Глебов. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 256 с.
4. Розенберг, А.М. Теория работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом / А.М. Розенберг, В.В. Суднишников. – http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/1933/v1_52_i1/a5_bw.pdf