

А.С. Мановицкий, к.т.н.

Институт сверхтвёрдых материалов В.Н. Бакуля НАН Украины

**РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СРЕЗА, ДЛИНЫ РЕЖУЩИХ
КРОМОК И ПЛОЩАДИ КОНТАКТА ПЕРЕДНЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ РЕЗЦА СО СНИМАЕМЫМ ПРИПУСКОМ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ И ВЫПУКЛОЙ ТОРОИДАЛЬНОЙ
ЧАСТИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ДЕТАЛИ**

Актуальная проблема прогнозирования характерных показателей контакта передней поверхности круглой режущей пластины с припуском срезаемого материала при чистовой токарной обработке деталей сложного профиля требует современных подходов для расчета необходимых параметров с отображением их физической сущности. В работе приведены анализ и результаты практической проверки расчетов длины режущих кромок, максимального сечения среза и площади контакта по передней поверхности на примере чистового точения закаленной стали ШХ 15 резцом с круглой пластиной ПКНБ.

Ключевые слова: *толщина среза; длина режущей кромки; площадь контакта; передняя поверхность; припуск; сложнопрофильная деталь.*

Постановка проблемы. Для отображения условий контактного взаимодействия передней поверхности резца со срезаемым припуском ra (рис. 1) представлена схема для расчета максимальной толщины среза и длины режущих кромок при точении резцом, оснащенным круглой пластиной радиусом r , в зависимости от радиуса пластины, глубины резания и продольной подачи на цилиндрическом участке сложнопрофильной детали.

Изложение основного материала. Толщина среза снимаемого припуска будет переменной по длине режущих кромок. Поскольку для круглой режущей пластины с плавающей вершиной резца вспомогательный угол в плане φ_1 будет иметь очень малое значение для малых значений подач и глубин резания при чистовом точении, в дальнейших расчетах мы им пренебрегаем для упрощения представлений о контактном взаимодействии. Предположим, что максимальная толщина среза будет представлена отрезком $AB = r - r_1$ на прямой O_1A .

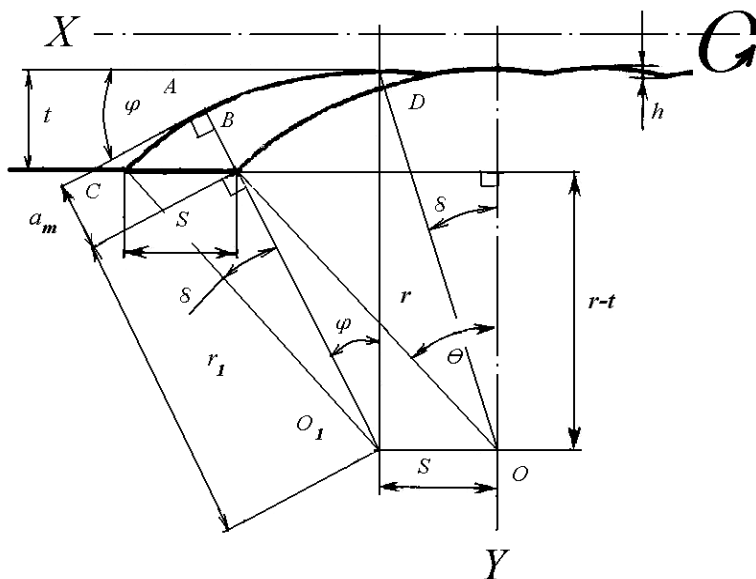


Рис. 1. Схема для расчета максимальной толщины среза на цилиндрической части сложнопрофильной детали

Главный угол в плане φ будет переменным в пределах от 0 на вершине резца до φ_{\max} в точке C врезания режущей кромки в поверхность заготовки. Но в точке C толщина среза также минимальна, как и на вершине резца, поэтому принимаем как значимое эффективное значение φ в точке A , соответствующее максимальной толщине среза a_m . Как представлено на рисунке 1, за один оборот детали отклонение вершины резца от оси Y составит величину угла δ , а ее перемещение вдоль оси X будет составлять величину S . Тогда значение угла δ находим через радиус пластины резца и продольную подачу:

$$\delta = \arctg \frac{S}{r} \quad (1)$$

При этом отклонение исходного положения точки B врезания режущей кромки в деталь будет составлять с осью Y величину Θ , которую можно найти из следующего уравнения:

$$\Theta = \arccos \frac{r-t}{r}. \quad (2)$$

Главный угол реза в плане φ находим как разницу углов Θ и δ :

$$\varphi = \Theta - \delta = \arccos \frac{r-t}{r} - \arctg \frac{S}{r} \quad (3)$$

Отрезок $O_1B = r_1$ находим как гипотенузу прямоугольного треугольника через косинус главного угла в плане:

$$r_1 = \frac{r-t}{\cos \varphi} = \frac{r-t}{\frac{r-t}{r} - \cos \arctg \frac{S}{r}}. \quad (4)$$

Тогда максимальная толщина среза снимаемого припуска на цилиндрическом участке детали сложного профиля может быть рассчитана по следующей формуле:

$$a_m = r - \frac{r-t}{\frac{r-t}{r} - \cos \arctg \frac{S}{r}}, \quad (5)$$

где r – радиус пластины; S – продольная подача; t – глубина резания.

Суммарная длина контакта режущих кромок с обрабатываемым материалом за один оборот детали будет равна:

$$b + b_1 = r \cdot \Theta + r \cdot \frac{\delta}{2}. \quad (6)$$

Длина контакта главной режущей кромки:

$$b = r \cdot \arccos \frac{r-t}{r}. \quad (7)$$

Длина контакта вспомогательной режущей кромки:

$$b_1 = r \cdot \arctg \frac{S}{r}. \quad (8)$$

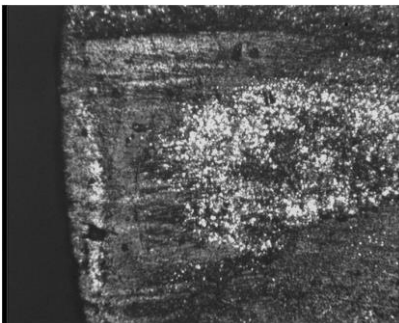
После подстановки полученных значений в (6) находим суммарную длину режущих кромок:

$$b + b_1 = r \cdot \left(\arccos \frac{r-t}{r} + \arctg \frac{S}{r} \right). \quad (9)$$

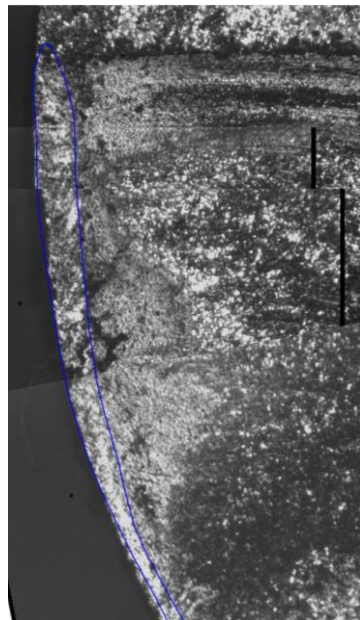
Площадь контакта передней поверхности резца со снимаемым припуском будет состоять из суммы площадей криволинейных треугольников, образованных главной и вспомогательной режущими кромками. Поскольку высотой треугольника, образованного вспомогательной режущей кромкой, является шероховатость R_z обработанной поверхности, то есть – при чистовой обработке – величина на два порядка меньшая, чем остальные параметры оценки длины режущих кромок, принимаем допущение о том, что площадью сечения среза будет произведение половины суммарной длины режущих кромок на максимальную толщину среза:

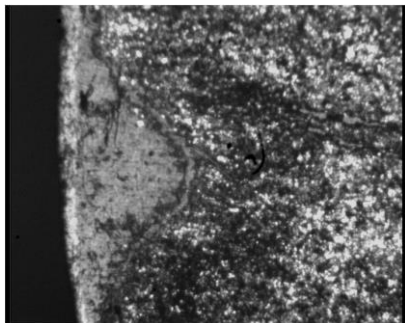
$$A_{\text{шц}} = \frac{1}{2} r \cdot \left(\arccos \frac{r-t}{r} + \arctg \frac{S}{r} \right) \left(r - \frac{r-t}{\frac{r-t}{r} - \cos \arctg \frac{S}{r}} \right). \quad (10)$$

Приведены рассчитанные по выше приведенным формулам и измеренные данные по значениям суммарных длин контакта кромок круглой режущей пластины диаметром 7 мм из киборита с передним углом $\gamma = -10^\circ$ при точении закаленной стали ШХ15 твердостью 58–62 HRC₃ со скоростью резания 75 м/мин.



a)





b)

c)

Рис. 2. Изображения пятен контакта снимаемого припуска и стружки с передней поверхностью инструмента с пластинами Киборита круглой формы точения закаленной стали ШХ15 твердостью 58–62 HRC_Э со скоростью резания 75 м/мин., подачей и глубиной резания:

a) $t = 0,3$ мм; $S = 0,08$ мм/об.;

b) $t = 0,1$ мм; $S = 0,19$ мм/об.;

c) $t = 0,1$ мм; $S = 0,19$ мм/об.

Расчеты производились при усадке стружки, соответствующей ее полученному значению из (11) [1]:

$$1 = \frac{1}{2} \cdot \zeta^{-0,9} \left[\zeta \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{2}{\cos \gamma} \right] \quad (11)$$

для определенного значения переднего угла. В частности, для угла $\gamma = -10^\circ$ усадка стружки соответствует значению 3,433.

Таблица 1
Расчетные и измеренные показатели параметров контакта с инструментом по передней поверхности

Подача, S, мм/об.	Глубина резания t, мм	Максимальная толщина среза, мм	Сумма длин режущих кромок, мм		Длина контакта по передней поверхности, мм		Площадь контакта со снимаемым припуском, мм ²	
			расчет	замер	расчет	замер	расчет	замер
0,08	0,1	0,019	0,837	0,8	0,130	0,35	0,054	0,140
	0,3	0,033	1,449	1,0	0,227	0,45	0,164	0,225
	0,5	0,043	1,871	1,65	0,295	0,50	0,276	0,412

0,19	0,1	0,045	0,837	–	0,309	–	0,129	–
	0,3	0,079	1,449	1,60	0,542	0,55	0,393	0,440
	0,5	0,102	1,871	1,80	0,700	0,75	0,655	0,675
0,38	0,1	0,090	0,837	0,9	0,618	0,65	0,259	0,293
	0,3	0,157	1,449	1,65	1,078	1,00	0,781	0,825

Таблиця 1 показує достатнє відповідність розрахункових і вимірених значень довжини і площі контакту для великих сечень сріза і доволно велике розходження даних для малих товщин сріза. Велика різниця отриманих розрахункових і вимірених величин, яка має місце при малих подачах, пояснюється впливом радіуса округлення режущої кромки на дійсне значення переднього кута різця, яке фактично буде мати великі негативні значення, ніж статичні кути заточки різця. Крім того, при точенні різцем з гострою кромкою достатньо швидко відбувається приработорочний знос і вихідна режуща кромка обов'язково буде інтенсивно округлятися.

Якщо для великих значень сечення сріза вплив округленої режущої кромки на довжину і площу контакту буде незначущим, то при малих подачах і глибинах різання його вплив ігнорувати не можна, так як до половини срізаемого припуску може приходиться на округлену режущу кромку. Крім того, оскільки експериментальні значення отримані при несвободному різанні, кінематичне значення переднього кута буде відрізнятися від статичного кута заточки і установки різця, що також необхідно приймати до уваги.

На малюнку 3 наведено схему контактної взаємодії круглої режущої пластини з оброблюваною деталлю і зняття припуску на випуклої тороїдальній частині складнопрофільної поверхності.

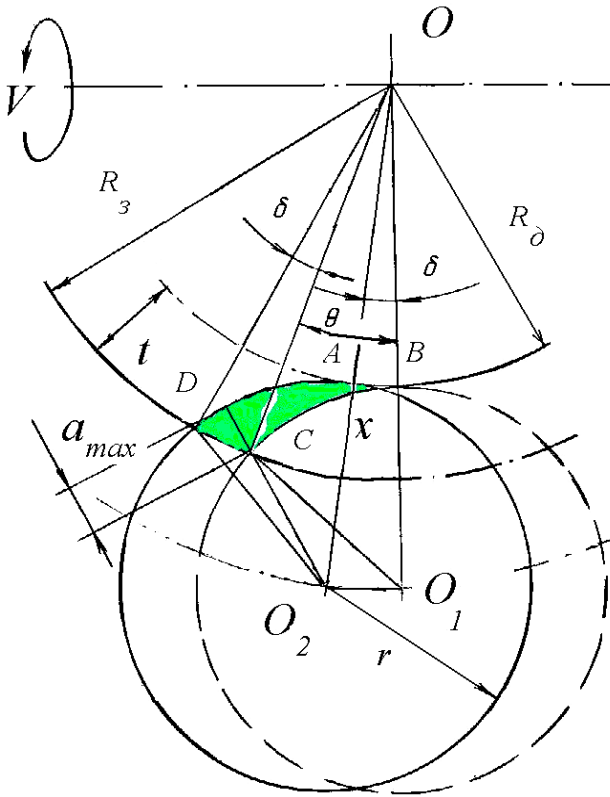


Рис. 3. Схема к расчету максимальной толщины среза на выпуклой тороидальной части сложнопрофильной детали

В отличие от точения по цилиндрической образующей сложного профиля, когда вершина резца и центр окружности режущей пластины смещаются на одинаковую величину подачи на один оборот детали, при перемещении центра режущей пластины из точки O_1 в точку O_2 за один оборот вершина резца переходит из точки B в точку A . Предположим, что отрезок O_1O_2 равен подаче резца, то есть $O_1O_2 = S_o$, где S_o – контурная подача на оборот центра пластины, тогда отрезок $AB = S_{oc}$, а именно S_{oc} – действительная подача вершины резца на выступающей (выпуклой) тороидальной части криволинейной поверхности детали. Точкой X отмечено положение максимального выступа микронеровностей обработанной

поверхности, формируемого главной и вспомогательной кромками резца. Точка X лежит на перпендикуляре, проведенном через середину отрезка AB . Точки A и B лежат на линиях сопряжения радиусов обрабатываемой детали и режущей пластины, как видно из приведенной схемы. Контурная подача, определяемая по центру режущей пластины, связана с подачей этого центра вдоль оси X следующей зависимостью:

$$S_o = S_x \cdot \cos \delta. \quad (12)$$

Из произведенных геометрических построений очевидно, что треугольники O_1OC и O_2OD равны между собой. Максимальная толщина среза может быть найдена из уравнения:

$$a_{\max}^{ec} = r - O_2C. \quad (13)$$

По теореме косинусов из треугольника O_1OC имеем:

$$(O_1C)^2 = r^2 = R_3^2 + (r + R_3 - t)^2 - 2R_3(r + R_3 - t)\cos \Theta \quad (14)$$

и

$$\cos \Theta = \frac{R_3^2 - r^2 + (r - t + R_3)^2}{2R_3(r - t + R_3)}, \quad (15)$$

где r – радиус пластины, мм; R_3 – радиус выступа профиля заготовки, мм; t – глубина резания, мм.

Угол $O_1OC = \Theta$ будет:

$$\Theta = \arccos \frac{R_3^2 - r^2 + (r - t + R_3)^2}{2R_3(r - t + R_3)}. \quad (16)$$

Угол δ , на который смещается вершина резца за один оборот детали, находим из треугольника O_1OO_2 :

$$\delta = \arctg \frac{S_x}{R_d + r}, \quad (17)$$

где R_d – радиус выступа профиля детали на выпуклом тороидальном участке.

По теореме косинусов из треугольника O_2OC имеем:

$$(O_2C)^2 = R_3^2 + (r + R_d)^2 - 2R_3(r + R_d)\cos(\Theta - \delta). \quad (18)$$

Извлекая квадратный корень из полученного выражения и подставляя полученное выражение в (13) для расчета максимальной толщины среза при точении выступающего участка тороидальной поверхности и принимая во внимание, что радиус заготовки составляет суммарную величину радиуса детали и припуска на обработку, находим искомое выражение:

$$a_{\max}^{\text{ec}} = r - \sqrt{\frac{(R_d + t)^2 + (r + R_d)^2 - 2(R_d + t)(r + R_d) \rightarrow \cdot}{\rightarrow \cos \left[\arccos \frac{(R_d + t)^2 - r^2(r + R_d)^2}{2(R_d + t)(r + R_d)} - \arctg \frac{S_x}{r + R_d} \right]}}. \quad (19)$$

Суммарную длину режущих кромок находим из криволинейного треугольника DXC . Длина L режущих кромок равна длинам дуг DA или BC и равна произведению радиуса r пластины и угла CO_1O .

Опять же по теореме косинусов из треугольника CO_1O находим угол CO_1O :

$$CO_1O = \arccos \frac{r^2 + (r + R_d)^2 - (R_d + t)^2}{2r(r + R_d)}. \quad (20)$$

И тогда суммарная длина режущих кромок будет найдена из уравнения:

$$L = r \cdot \arccos \frac{r^2 + (r + R_d)^2 - (R_d + t)^2}{2r(r + R_d)}. \quad (21)$$

Площадь сечения среза A_{Rec} для выступающего тороидального участка сложнопрофильной детали может быть найдена как площадь криволинейного треугольника DXC с основанием L и высотой a_{\max}^{ec} .

$$A_{\text{Rdñ}} = \frac{r}{2} \cdot \arccos \frac{r^2 + (r + R_d)^2 - (R_d + t)^2}{2r(r + R_d)} \times \quad (22)$$

$$\times \left\{ r - \sqrt{\times \rightarrow \cos \left[\arccos \frac{(R_d + t)^2 + (r + R_d)^2 - 2(R_d + t)(r + R_d)}{2(R_d + t)(r + R_d)} - \arctg \frac{S_x}{r + R_d} \right]} \right\}.$$

Действительное значение подачи на радиусной части выступающей тороидальной поверхности находим из подобия криволинейных треугольников OO_1O_2 и OBA . С учетом $AB = S_{ec}$ выражение для определения значения действительной подачи на выступающем тороидальном участке радиусом R_d будет иметь следующий вид:

$$S_{ec} = \frac{S_o \cdot R_d}{R_d + r} \quad (23)$$

или, после преобразований:

$$S_{ec} = \frac{S_o}{1 + \frac{r}{R_d}}. \quad (24)$$

Поскольку назначение радиуса режущей пластины $R_d \geq r$ является необходимым условием, то исходя из (24) очевидно, что действительная подача по образующей линии сложного профиля на выступающем тороидальном участке радиусом R_d всегда будет меньше номинальной, задаваемой по линии перемещения центра окружности режущей пластины.

Исходя из этого положения, можно утверждать, что, принимая значение подачи $S = const$ на цилиндрическом участке сложного профиля детали, при переходе на выступающую тороидальную поверхность значение подачи можно увеличивать, назначая следующие значения без ущерба для шероховатости обработанной поверхности на этом участке:

$$S_{ec} = S_o \cdot \frac{1}{1 + \frac{r}{R_d}}. \quad (25)$$

С учетом зависимости контурной подачи от подачи инструмента вдоль оси X из (12) получаем следующее выражение:

$$S_{ec} = S_x \cdot \cos \delta \cdot \frac{1}{1 + \frac{r}{R_d}}. \quad (26)$$

С учетом значения угла δ из (17) находим значение действительной подачи на выступающем тороидальном профиле в зависимости от осевой подачи центра режущей пластины:

$$S_{ec} = S_x \cos \arctg \frac{S_x}{R_d + r} \cdot \frac{1}{1 + \frac{r}{R_d}}. \quad (27)$$

При этом второй множитель можно считать коэффициентом повышения производительности обработки. Знаменатели множителей в (27) всегда будут больше единицы, значит, фактическая подача по выпуклому тороидальному контуру детали всегда будет меньше заданной по центру режущей пластины.

Вывод. Полученные выражения для расчета максимальной толщины среза и площади сечения срезаемого слоя в дальнейшем используются для расчета прочности режущего клина резца и составляющих силы резания.

Поскольку действительная вершина резца, оснащенного круглой режущей пластиной, при точении выпуклого тороидального профиля будет «обкатывать» контур детали, при этом одновременно перемещаясь по самой режущей кромке, произвести точные замеры суммарных длин режущих кромок и других приводимых параметров оценки условий контакта резца со снимаемым припуском по передней поверхности не представляется возможным.

Список использованной литературы:

1. Отчет ИСМ НАН Украины по теме № 1865 «Исследования процессов сложнопрофильной обработки износостойких железоуглеродистых сплавов инструментами из кубического нитрида бора». № госрегистрации 0105U005606. – К., 2008. – 184 с.

МАНОВИЦКИЙ Александр Степанович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института сверхтвердых материалов В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

– механическая обработка инструментами из сверхтвердых материалов.

Статья поступила в редакцию 10.07.2015