

УДК 621.9.01

DOI: 10.12737/article\_5928313a1d2191.50016044

**А.С. Ямников**, д.т.н.

(Тульский государственный университет,  
300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92)

**Д.П. Волков**, к.т.н.

(ЗАО «ПО «Тулаэлектропривод», 301114, Россия, Тульская область,  
Ленинский район, пос. Плеханово, ул. Заводская, д. 1)

E-mail: Yamnikovas@mail.ru; dreamslider@mail.ru

## **Влияние угла профиля передней поверхности резца на степень деформации сдвига**

*Рассмотрено влияние угла профиля передней поверхности резца на степень деформации сдвига. Приведены аналитические зависимости для определения углов схода стружки, относительного сдвига, степени деформации сдвига и величины касательных напряжений в зоне резания с учетом влияния прочности обрабатываемого материала, ширины и толщины срезаемого слоя и коэффициента трения. Зависимости проверены экспериментально при резании резцом с трапецидальным профилем.*

**Ключевые слова:** профильный резец; деформация сдвига; угол схода стружки.

**A.S. Yamnikov**, D. Eng.,

(State University of Tula, 92, Lenin Avenue, Tula 300012, Russia)

**D.P. Volkov**, Can. Eng.

(CC "PC "Tulaelectrodrive", 1, Zavodskaya Str., Plekhanovo, Lenin Region, Tula Province 301114, Russia)

## **Impact of cutting face profile angle upon shear deformation degree**

*It is established that cutting with gear-cutting and thread-cutting tools is not free that results in the increase of loading upon tool tips and their quick wear. The layers of metal cut are subjected to considerable shear deformation and also to other kinds of deformation. In this connection the wear character of a tool and its properties will change. There is considered a process of chip removal by trapezoidal and triangular cutters (as in case of metal cutting off with teeth of a hob may be used not three but two tool tips) and the impact of a cutting face profile angle upon a shear deformation degree is also considered. There are shown analytical dependences for the definition of angles of a chip flow, a relative shear, a deformation degree of a shear and a value of tangential stresses in the cutting area taking into account the influence of the strength of material machined, width and thickness of a layer cut and a friction factor. The dependences are checked up at cutting with a trapezoidal cutter.*

**Keywords:** profile cutter; shear deformation; angle of chip flow.

Резание зуборезными и резборезными инструментами является несвободным [1, 2]. Это приводит к увеличению нагрузки на режущие кромки инструмента и их повышенному износу [3 – 5]. При рассмотрении механики образования сливной стружки пластически деформированную зону представляют в виде параллелограмма, а сам процесс образования слив-

ной стружки как результат последовательных сдвигов тонких слоев металла по плоскости сдвига, создающей с направлением движения резца угол сдвига  $\theta$  [6 – 7].

При свободном резании характеристиками величины деформации срезаемого слоя являются относительный сдвиг  $\zeta$  и коэффициент усадки  $K$ .

$$\zeta = \operatorname{ctg}\theta + \operatorname{tg}(\theta - \gamma); \quad (1)$$

$$K = \frac{\cos(\theta - \gamma)}{\sin\theta}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что  $\zeta$  и  $K$  зависят от переднего угла  $\gamma$  и угла сдвига  $\theta$ . Угол сдвига оказывает наибольшее влияние, так как его небольшое изменение приводит к большому изменению деформации.

Слои срезаемого металла подвергаются значительной деформации сдвига, а также другим видам деформации. В связи с этим изменится характер износа инструмента и его характеристики.

С целью улучшения условий резания рассмотрим процесс снятия стружки трапецидальным и треугольным резцами (так как в случае срезания металла зубьями червячной фрезы могут быть задействованы не три, а две режущие кромки). При несвободном резании двумя режущими кромками сдвиг тонких слоев металла идет под углом к ним. Для определения величины сдвига следует определить составляющие деформации сдвига – продольную и поперечную. Продольная составляющая направлена вдоль режущей кромки, поперечная – нормально к режущей кромке.

Рассмотрим процесс срезания слоев металла резцом с двумя режущими кромками (рис. 1) с углами в плане  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  и режущими кромками  $AB$  и  $BC$ .

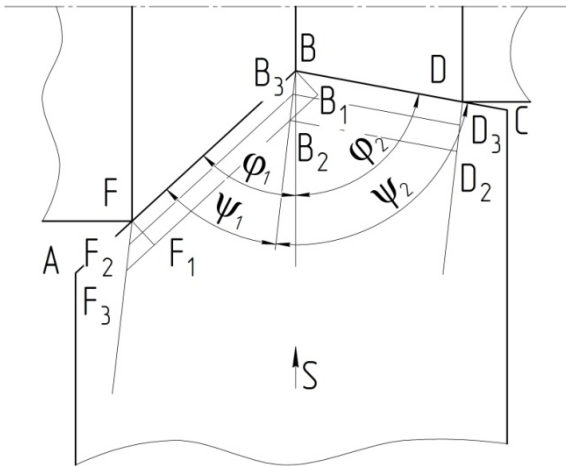


Рис. 1. Схема деформации элементов стружки

При свободном резании элемент стружки, срезаемый кромкой  $AB$ , имеет форму  $FBB_1F_1$ , образующуюся в результате сдвига слоев по плоскости сдвига, перпендикулярно режущей кромке  $AB$ . Образовавшийся элемент перемещается перпендикулярно  $AB$ , но такому его свободному перемещению мешает второй элемент стружки, перемещающийся по нормали к режущей кромке  $BC$ . Элемент  $FBB_1F_1$ ,

подвергаясь дополнительному сдвигу, примет форму  $FBB_2F_2$ , становясь длиннее и уже. Аналогичный процесс произойдет со стружкой, срезаемой режущей кромкой  $BC$ .

Степень деформации сдвига выразим через относительный сдвиг  $\zeta_B$ . Тогда, для стружки, срезаемой режущей кромкой  $AB$ , получим формулу

$$\zeta_{1B} = \frac{B_2B_1}{B_1B} = \operatorname{ctg}\psi_1. \quad (3)$$

Для стружки, срезаемой режущей кромкой  $BC$ , получим:

$$\zeta_{2B} = \operatorname{ctg}\psi_2. \quad (4)$$

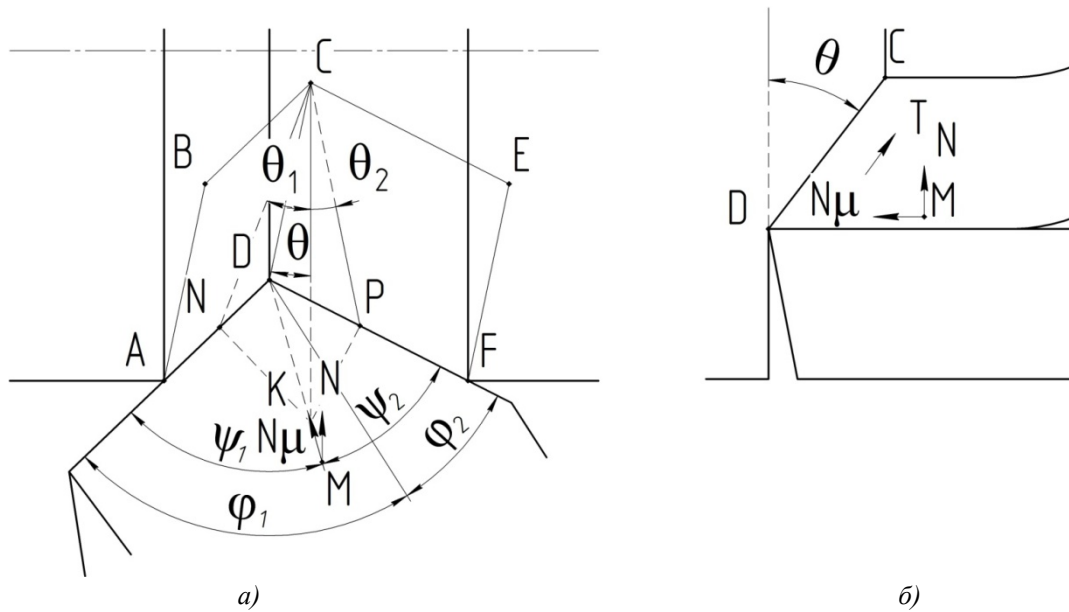
Из выражений (3) и (4) можно сделать вывод, что интенсивность сдвига зависит от угла схода стружки  $\psi$  – угла между направлением схода стружки и режущей кромкой. Чем меньше угол  $\psi$ , тем больше величина сдвига. Например, при нарезании впадины трапецидальным резцом с углом профиля  $60^\circ$  относительный сдвиг для стружки, срезаемой вершиной резца, составит  $0^\circ$ , а для стружки, срезаемой боковыми кромками, составит  $\zeta_{1B} = \zeta_{2B} = 1,73$ .

Из-за неодинаковой толщины стружки происходит разрыв по ее границам и скольжение по боковым поверхностям. Если же прочности стружки в сечении  $BB_2$  оказывается достаточно, то разрыва не произойдет. Тогда элемент стружки  $FBB_2F_2$  испытает со стороны соседней стружки дополнительное сжатие и примет форму  $FBB_3F_3$ . В этом случае угол сдвига уменьшится, толщина стружки увеличится.

При одновременной работе режущих кромок V-образного или трапецидального резца возможно образование двух типов стружки: монолитной, без разрывов (чаще бывает плоской или слабо завитой в спираль); с разрывом по боковым поверхностям в месте давления соседних стружек (каждая из частей стружки закручена в спираль).

Согласно формуле (1) для определения нормальной составляющей деформации сдвига требуется найти значение угла сдвига  $\theta$ . Для этого за плоскость сдвига принимаем плоскость максимальных касательных напряжений.

Со стороны передней поверхности резца в процессе резания на срезаемый слой действуют сила нормального давления  $N$  и трения о переднюю поверхность  $N\mu$ , где  $\mu$  – коэффициент трения. В качестве точки приложения этих сил возьмем точку  $M$  (рис. 2).



**Рис. 2. Силы нормального давления и трения:**  
 а – плоскости сдвига; б – ребро пересечения плоскостей сдвига

Через режущие кромки под углами сдвига  $\theta_1$  и  $\theta_2$  к направлению движения резца проведем плоскости  $ABCD$  и  $FECD$ . Из точки  $C$ , лежащей на линии пересечения плоскостей, проведем прямую  $CK$ , нормальную к передней поверхности. Перпендикулярно к режущим кромкам через  $CK$  проведем плоскости  $CKN$  и  $CKP$ .

Из полученных треугольников после некоторых преобразований получим выражения:

$$\operatorname{tg}\theta_2 = \frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1} \operatorname{tg}\theta_1; \quad (5)$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\sin \psi_1}. \quad (6)$$

Спроектировав  $N$  и  $N\mu$  на плоскость  $CKD$ , определим величины касательных напряжений:

$$T = \frac{N}{\cos \rho} \cos(\theta + \rho), \quad (7)$$

где  $\rho$  – угол трения,  $\operatorname{tg} \rho = \mu$ .

С учетом (5) величина касательных напряжений равна

$$\tau = \frac{N}{\cos \rho} \cos(\theta + \rho) \left( \frac{a_1 b_1}{\sin \theta_1} + \frac{a_2 b_2}{\sin \theta_2} \right). \quad (8)$$

Угол  $\theta_2$  является функцией  $\theta_1$ , следовательно, значение касательных напряжений зависят

от него, продифференцировав уравнения (5), (6) и (8) по  $d\theta_1$ , получим выражение:

$$\frac{\operatorname{tg}\theta_1 + \sin \psi_1 \operatorname{tg} \rho \left( \frac{a_1 b_1}{\sin \theta_1} + \frac{a_2 b_2}{\sin \theta_2} \right) \frac{\sin \psi_1}{\sin^2 \psi_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1} + \operatorname{tg}\theta_1 \operatorname{tg} \rho - \sin \psi_1 \left( \frac{a_1 b_1}{\sin \theta_1} + \frac{a_2 b_2}{\sin \theta_2} \right) \frac{\sin \psi_2 \cos^3 \theta_2}{\sin^2 \psi_1 \cos^2 \theta_1}}{\sin^2 \theta_1} \cos \theta_1 + \frac{a_2 b_2}{\sin^2 \theta_2} \frac{\sin \psi_2 \cos^3 \theta_2}{\sin \psi_1 \cos^2 \theta_1} = 0. \quad (9)$$

Полный относительный сдвиг при одновременной работе двух режущих кромок будет равен:

$$\zeta = \sqrt{\zeta_B^2 + \zeta_{II}^2}. \quad (10)$$

По уравнениям (1) – (5), (9) и (10) можно сделать вывод, что при срезании металла резцами с двумя режущими кромками величина деформации слоя зависит от коэффициента трения  $\mu$ , углов сбега стружки  $\psi_1$  и  $\psi_2$  и сечения срезаемых слоев  $a_1 b_1$  и  $a_2 b_2$ . Интенсивность пластической деформации, главным образом, зависит от угла сбега стружки. Чем меньше угол сбега стружки, тем больше трение, а, следовательно, и деформация срезаемого слоя. Он возрастает с увеличением продольной и нормальной составляющих относительного сдвига.

При срезании слоя металла резцом с треугольным профилем стружка, наряду с давлением с передней поверхности, испытывает давление по смежным боковым поверхностям  $N$ , вследствие чего происходят дополнитель-

ные сдвиги вдоль режущих кромок по плоскости сдвига [1, 2].

В зависимости от величины дополнительных сдвигов происходит изменение направления схода стружки и углов ее сбега  $\psi_1$  и  $\psi_2$ .

$$\psi_2 = \varphi_1 + \varphi_2 - \psi_1, \quad (11)$$

$$\frac{C_1 b_1 a_1 \text{ctg}^{m_1} \psi_1}{\sin \theta_1 \sin \psi_1} = \frac{C_2 b_2 a_2 \text{ctg}^{m_2} (\varphi_1 + \varphi_2 - \psi_1)}{\sin \theta_2 \sin (\varphi_1 + \varphi_2 - \psi_1)}, \quad (12)$$

где  $C$  и  $m$  – величины, зависящие от обрабатываемого материала, деформации и других параметров [1].

Уравнения (11) и (12), нельзя использовать для определения углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , так как неизвестны величины  $C$  и  $m$ , но они дают возможность оценить влияние параметров на направление схода стружки. Так, увеличение параметров среза одной из режущих кромок реза или уменьшение угла  $\varphi$  отклоняет стружку в направлении другой режущей кромки, что ведет к увеличению деформации срезаемого слоя.

При срезании слоев фасонным инструментом с несколькими режущими кромками направление схода стружки будет определяться формой режущего профиля и распределением сечения среза по нему. Если направление схода с одной из кромок составит маленький угол, то это вызовет повышение деформации срезаемого слоя, а значит и усиленный износ поверхности. Увеличение срезаемого слоя одной из кромок изменит направление схода стружки и улучшит условия резания на других участках, что повысит износостойкость инструмента (рис. 3).

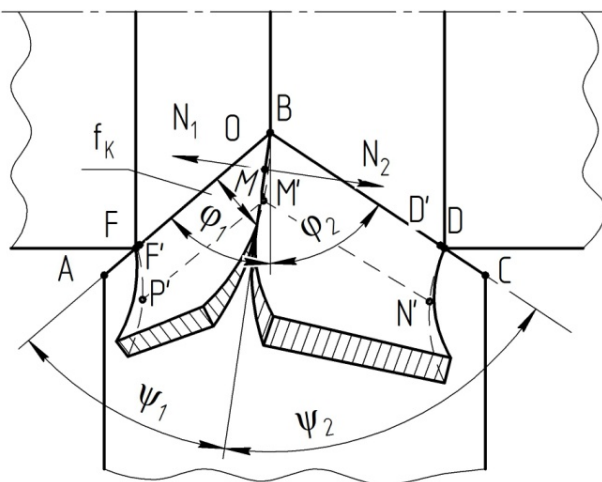


Рис. 3. Образование стружки при резании V-образным резцом

Если металл при резании переходит в стружку только путем сдвига, то стружка будет иметь монолитный вид. В результате давления  $N_1$  смежных сегментов стружек друг на друга сдвиг осуществляется также вдоль режущих кромок.

Монолитной стружка будет только в случае, когда возникшее под действием давления  $N_1$  нормальное напряжение  $\sigma$  окажется меньше предела текучести  $\sigma_T$ :

$$\sigma = \frac{C_1 b_1 \text{ctg}^{m_1} \psi_1}{f_K K_1 \sin \theta_1}, \quad (13)$$

где  $f_K$  – ширина контакта стружки с передней поверхностью реза.

При превышении предела текучести возникает смятие, изменяющее вид стружки и другие параметры, такие как коэффициент усадки и неравномерность усадки по ширине. Сила  $N_1$  приложена в точке  $O$ . Смежные боковые поверхности стружки оказывают давление по площади  $BMM'B'$ , после прекращения контакта с передней поверхностью элементы стружки начинают завиваться в спираль и давление на них прекращается.

Учитывая, что резец с  $\gamma = 0^\circ$ , то  $K_1 = \text{ctg} \theta_1$ , и угол  $\theta_1 \leq 20^\circ$ , а значит  $K_1 \sin \theta_1 \approx 1$ , то выражение (13) для определения величины нормальных напряжений на смежных боковых поверхностях [1] может быть приведено к виду:

$$\sigma = \frac{C_1 b_1 \text{ctg}^{m_1} \psi_1}{f_K}. \quad (14)$$

Из выражения (12) следует, что одним из факторов, влияющих на величину нормальных напряжений  $\sigma$ , является  $f_K$  – ширина контакта стружки с передней поверхностью, направление схода стружки и ширина среза. В свою очередь ширина контакта  $f_K$  определяется толщиной срезаемого слоя и коэффициентом усадки (так же зависящего от ряда факторов – геометрии инструмента, скорости резания, свойств материала, типа применяемой СОЖ и др.). Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что определяющими факторами при нахождении нормальных напряжений являются ширина срезаемого слоя и направление схода стружки.

При увеличении ширины срезаемого слоя  $b$  или уменьшении угла сбега стружки  $\psi$  нормальные напряжения  $\sigma$  начинают возрастать. При  $\sigma > \sigma_T$  металл начинает течь, вследствие чего в стружке появляется разрыв по смеж-

ным поверхностям. При резании металла резцом с углом  $\varphi_1 = \varphi_2 = 45^\circ$  при глубине резания 2 мм была получена монолитная стружка. При параметрах резца  $\varphi_1 = \varphi_2 = 20^\circ$  и при глубине резания 4 мм стружка имеет разрыв. Целью проведенных экспериментов являлось определение факторов, наиболее интенсивно влияющих на величины деформаций срезаемого слоя и оценка самих величин деформаций.

Эксперимент проводился на токарно-винторезном станке трапецеидальным резцом. Резание осуществлялось с радиальной подачей, при этом изменялась подача и применялись резцы с различными углами в плане и длиной вершинной кромки. Срезание слоев металла производилось двумя и тремя режущими кромками. По мере врезания ширина

срезаемого слоя вершинной кромкой оставалась неизменной, а ширина, срезаемая боковыми кромками, увеличивалась. Глубина резания составляла от 1 до 7 мм.

Полученная стружка измерялась на инструментальном микроскопе, при этом контролировались следующие параметры: углы  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  и  $\psi_3$ ; толщина стружки на наружных и внутренних поверхностях; ширина стружки по режущим кромкам. За параметры, характеризующие степень деформации, были приняты продольная составляющая относительного сдвига  $\zeta_B$  и коэффициент поперечной усадки  $K$ . Эксперименты, проведенные с использованием резца с трапецеидальным профилем и углами  $\varphi_1 = \varphi_2 = 20^\circ$  и ширине вершинной кромки 3 мм, представлены на рис. 4.

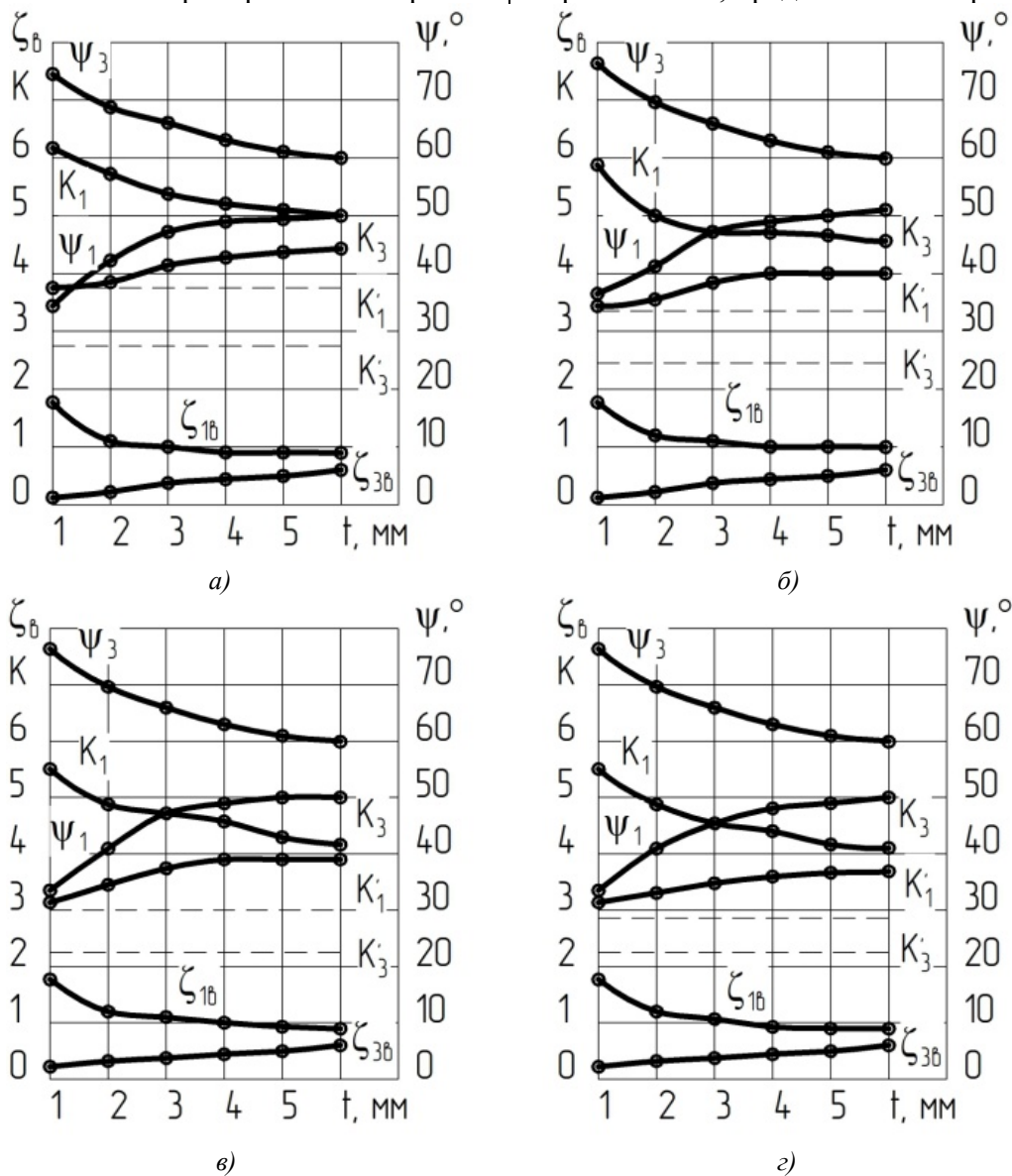


Рис. 4. Величина деформации срезаемых слоев вершинной и одной боковой кромкой резца при различной глубине резания:

$a - 0,1$  мм/об;  $б - 0,14$  мм/об;  $в - 0,20$  мм/об;  $г - 0,25$  мм/об;  $K_1'$  – коэффициент поперечной усадки при свободном резании боковой кромкой,  $K_1$  – вершинной

Из графиков видно, что с увеличением глубины резания или ширины слоя, которую срезают боковая режущая кромка, стружка начинает отклоняться к вершинной кромке, в связи с чем  $\zeta_B$  и  $K_1$  от боковой кромки уменьшаются, а от вершинной растут. С уменьшением угла схода стружки  $\psi$  увеличивается деформация срезаемого слоя. Деформация срезаемого слоя при резании несколькими режущими кромками всегда больше, чем при свободном резании, так как стружка при сходе отклоняется от перпендикуляра к режущей кромке. С увеличением подачи или толщины срезаемого слоя усадка будет снижаться, но медленнее

чем это наблюдается при свободном резании. Основным параметром, влияющим на степень деформации, является угол схода стружки  $\psi$ .

На рис. 5 изображены графики показывающие изменение деформации слоев, срезаемых тремя режущими кромками с длиной вершинной режущей кромки 3 мм.

На графиках показаны значения параметров  $\psi$ ,  $\zeta_B$  и  $K_1$  от одной из боковых кромок. Кривые второй боковой кромки идентичны и поэтому не отображены. Стружка по вершинной кромке сходится по нормали к ней, для нее значения  $\psi = 90^\circ$ ,  $\zeta_B = 0^\circ$ , для упрощения эти графики также не показаны.

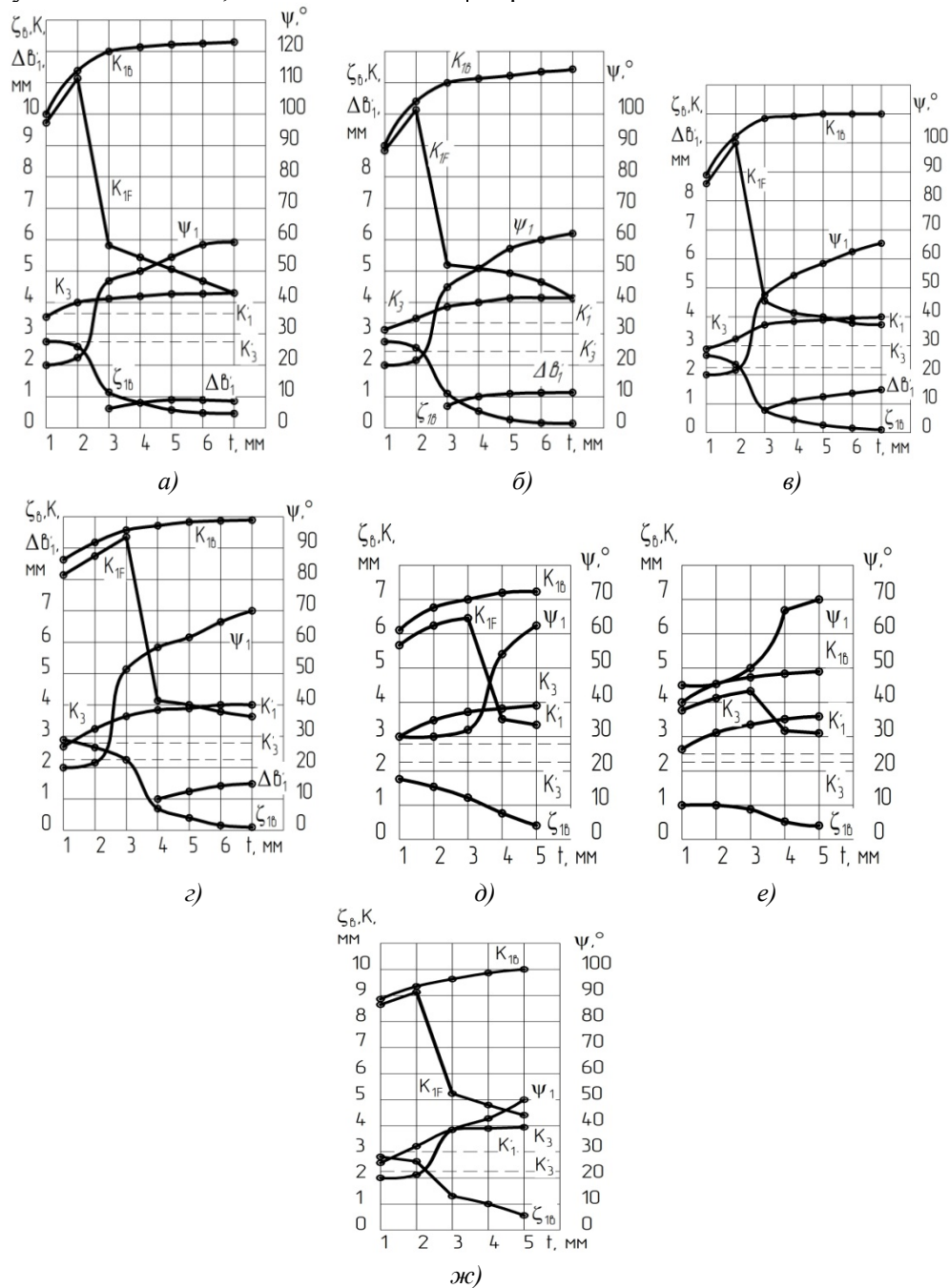


Рис. 5. Величина деформации слоев, срезаемых вершинной и двумя боковыми кромками резца при различной глубине резания

По графикам можно сделать следующие выводы: при срезании слоя до 2 мм стружка сходит под углом  $90^\circ$  к вершинной кромке. Деформация по ширине стружки от боковых кромок почти одинакова, стружка имеет монолитную структуру. Возрастает коэффициент усадки, что объясняется зависимостью коэффициента трения от величины срезаемого слоя. При дальнейшем увеличении глубины резания до 3 мм направление схода стружки резко меняется в сторону перпендикуляра к режущим кромкам, стружка меняет вид, на ней появляются разрывы по смежным поверхностям. Изменяется деформация по ширине стружки. Усадка стружки по наружной стороне снижается за счет уменьшения сдвига, а на смежной – продолжает расти из-за возросшей деформации сдвига и смятия смежных поверхностей.

Главной причиной износа задних поверхностей боковых режущих кромок является высокая степень деформации боковых слоев. При увеличении глубины резания до 7 мм слой, срезаемый вершинной кромкой, подвергается сильному сжатию вдоль кромки, сдвигу и смятию со стороны боковых кромок, что вызывается пересечением направлений схода стружки от боковых и вершинной кромок.

Деформация стружки, срезаемой многокромочным инструментом, всегда будет больше, чем при свободном резании. Наиболее тяжелыми участками являются те, что прилегают к смежным поверхностям стружки. Вследствие повышения деформации при работе многокромочного инструмента силы резания также будут выше, чем при свободном резании. Деформация снижается с увеличением подачи, а так же с ростом углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , так же следует отметить, что при постоянной ширине срезаемого слоя деформация снижается сильнее. Длина вершинной кромки не оказывает влияния на степень деформации.

Полученные результаты практически были использованы при разработке технологии изготовления винтовых выступов на пуансонах для выдавливания винтовых канавок на внутренней поверхности трубчатых заготовок [1, 8 – 10].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волков, Д.П., Маликов, А.А., Ямников, А.С. Формообразование многозаходных винтовых выступов на прессовой оправке: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ. 2016. – 141 с.
2. Ямников, А.С., Чуприков, А.О., Харьков, А.И. Повышение ресурса инструмента при нарезании усилен-

ной упорной резьбы на заготовках из высокопрочных материалов // –СТИН. – 2015. – №6. – С. 17–21.

3. Ямников, А.С., Чуприков, А.О., Харьков, А.И. Причины неравномерного износа резьбовых резцов по упорной стороне профиля // Материалы XV ВНТК Механики XXI века. 2016. №15. БрГУ, Братск. С. 13–18.

4. A.S. Yamnikov and A.O. Chuprikov. Chucks for Thin - Walled Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research. Vol. 35 No. 11, 2015. pp. 838–840.

5. A.S. Yamnikov, A.O. Chuprikov and A. I. Khar'kov. Extending Tool Life in Buttress-Thread Cutting on High-Strength Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 12, pp. 953–956.

6. Ямников, А.С., Ямникова, О.А. Экспериментальное определение силы резания при фрезоточении резьбы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 82–93.

7. Ямников, А.С., Чуприков, А.О., Харьков, А.И. Влияние переднего угла на усадку стружки при точении высокопрочных сталей // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации 2016. Матер. XVII Всероссийской НТК (г. Пермь, 17–18 ноября 2016 г.). ПНИПУ. С. 79–82.

8. Ямников, А.С., Волков, Д.П. Технологическое обеспечение качества винтовых прессовых оправок // Вестник машиностроения. –2016. – №3. – С. 55–58.

## REFERENCES

1. Volkov, D.P., Malikov, A.A., Yamnikov, A.S. *Multiple-thread Screw Lug Shaping on Press Mandrel*: monograph. –Tula: Publishing House of TulSU. 2016. – pp. 141.
2. Yamnikov, A.S., Chuprikov, A.O., Kharkov, A.I. *Tool Life Increase at Threading Strengthened Buttress Thread on High-strength Blanks* // –СТИН. – 2015. – №6. – pp. 17–21.
3. Yamnikov, A.S., Chuprikov, A.O., Kharkov, A.I. Reasons for uneven wear of thread chasers on buttress profile side // *Proceedings of the XV-th ASTC Mechanics for the XXI-st Century*. 2016. №15. BrSU, Bratsk. pp. 13–18.
4. A.S. Yamnikov and A.O. Chuprikov. Chucks for Thin - Walled Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research. Vol. 35 No. 11, 2015. pp. 838–840.
5. A.S. Yamnikov, A.O. Chuprikov and A. I. Khar'kov. Extending Tool Life in Buttress-Thread Cutting on High-Strength Blanks / ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2015, Vol. 35, No. 12, pp. 953–956.
6. Yamnikov, A.S., Yamnikova, O.A. Experimental definition of cutting force at thread milling // *Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences*. – 2015. – № 1. – pp. 82–93.
7. Yamnikov, A.S., Chuprikov, A.O., Kharkov, A.I. Face angle impact upon chip shrinkage at high-strength steels // *Aerospace Engineering, Science Intensive Technologies and Innovations 2016. Proceedings of the XVII-th All-Russian ST Conf.* (November 17–18, 2016 Perm). PNIPU. pp. 79–82.
8. Yamnikov, A.S., Volkov, D.P. Engineering support of screw press mandrels // *Bulletin of Mechanical Engineering*. –2016. – №3. – pp. 55–58.
9. Yamnikov, A.S., Volkov, D.P. Manufacturing screw projections on punch stamp // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Techniques*. 2011. – № 4/3 (288). – pp. 99–104.
10. Volkov, D.P., Yamnikov, A.S. Complex technology for manufacturing screw press mandrels // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences*. Edition 11: in 2 Parts. – Tula: Publishing House of TulaSU, 2012. Part 1. – pp. 292–298.

Рецензент д.т.н. А.С. Янюшкин