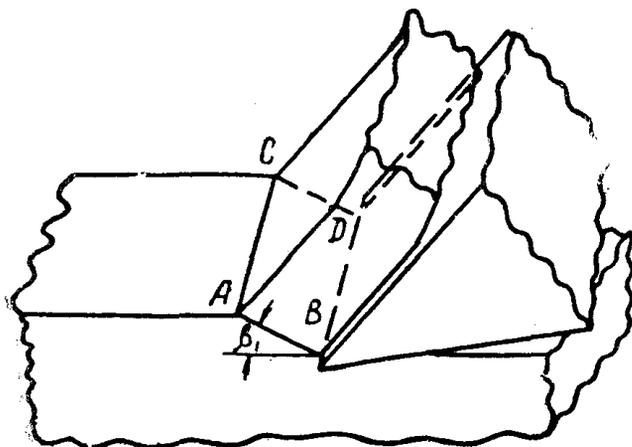


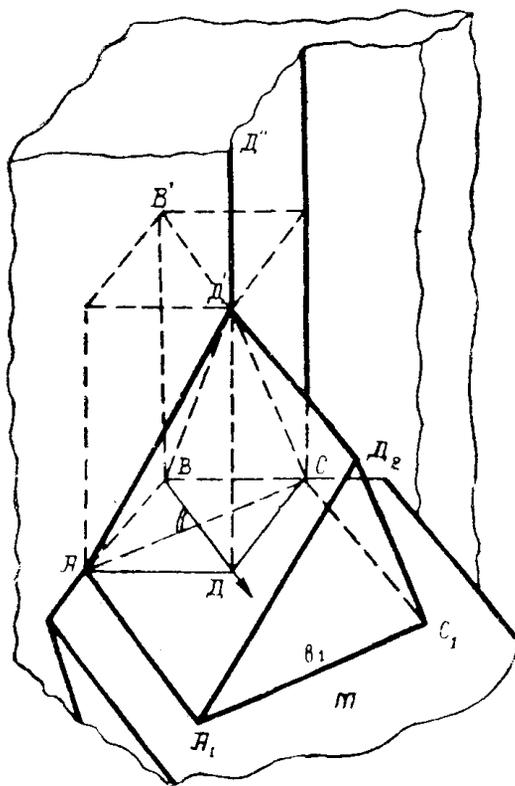
$\frac{a \cdot b}{\sin \beta_1}$ где a —толщина среза, b —ширина среза. Направление движения стружки по передней грани будет перпендикулярно режущей кромке BD .



Фиг. 1

Как видно из схемы, о форме плоскости сдвига можно судить по линии пересечения плоскости сдвига с боковой поверхностью срезаемого слоя $BACD$ и по режущей кромке BD , от которой начинаются сдвиги.

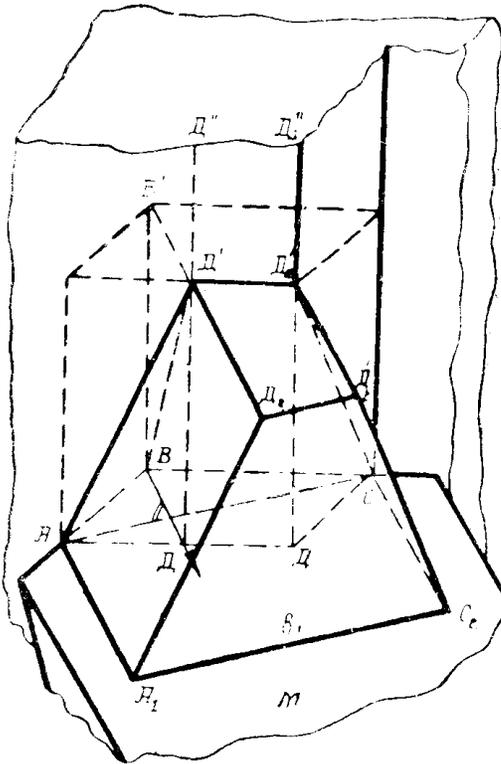
Для того, чтобы представить возможную форму поверхности сдвига при резании двухкромочным резцом были проведены специальные опыты по „резанию“ пластилина. С такого пластично-



Фиг. 2

го материала срезались стружки значительного размера ($s \times t = 10 \times 10 \text{ мм}$), а методом остановки резания получались корни „стружек“. Рассмотрение корней „стружек“ позволило представить схему образования равнобокой стружки, как показано на фиг. 2, а обратной стружки на фиг. 3.

Равнобокая стружка (фиг. 2) получалась тогда, когда сечение среза $ABCD$ представляло собой ромб, со стороной $AB = BC$. Равнобокой такая



Фиг. 3

стружка была названа именно потому, что сечение среза при ее образовании представляет собой квадрат, или равносторонний ромб. На корне „стружки“ из пластины была видна граница переходящего слоя в стружку $AD'C$. Верхнее ребро „стружки“ $D'D_2$ образовывалось переходом ребра $D'D'$ срезаемого слоя в „стружку“. Движение „стружки“ по передней грани реза соответствовало направлению $BD \perp AC$ (перпендикулярно-му диагонали сечения среза AC).

Если зона деформации и при таком методе резания будет очень узкой и ее можно принять за поверхность, и если сдвиги начинаются от самой режущей кромки, то можно предположить, что поверхность сдвига в случае образования равнобокой стружки будет состоять из двух пересекающихся плоскостей в виде треугольников $AD'B$ и $BD'C$. В случае же образования стружки трапециевидального сечения (как получается при резании с подачами немного меньшими и, наоборот, большими глубины резания) поверхность сдвига будет представлять две пересекающиеся плоскости в виде треугольника и трапеции. При этом, если стружка по-

лучается обратная (при резании с $\frac{s}{t} > \frac{1}{\sin \varphi}$, как показано на фиг. 3),

то треугольная плоскость $AD'B$ располагается на главной режущей кромке, а трапециевидальная $BD'D_1C$ на вспомогательной; если же стружка получается обычной, то эти плоскости от режущих кромок поменяются местами.

Таким образом, при „резании“ пластины было установлено, что по конфигурации режущей кромки реза, по форме поперечного сечения стружки и по форме корня стружки можно относительно судить о форме поверхности сдвига и, следовательно, о самом процессе деформации.

Оказалось, что при резании меди, свинца и стали формы корней стружек при резании с соответствующими подачами, глубинами резания и соответствующими резцами получают подобными корням „стружек“ из пластилина. Причем, граница перехода срезаемого слоя в стружку в этих случаях была видна еще более отчетливо.

Доказать, что поверхности сдвигов являются достаточно близкими к плоскостям и могут быть приняты за плоскости при всех расчетах, связанных с определением деформации стружки и сил резания, можно следующим образом. Путем специальных опытов было доказано, что направление схода стружки по передней грани резца совпадает с перпендикуляром к диагонали AC поперечного сечения среза. Поэтому плоскость, проходящую через линию пересечения поверхностей сдвига BD' и через перпендикуляр BD можно назвать плоскостью схода стружки. В случае, если поверхности сдвига являются плоскостями, в любых сечениях корня стружки, параллельных плоскости схода стружки, должны получиться одни и те же постоянные для данного корня величины углов β_1 , между направлением движения резания и направлением поверхности сдвига.

Проверка этого предположения была осуществлена при резании стали 12 ХНЗА. Эта сталь была выбрана в качестве обрабатываемого материала потому, что ее высокие пластичные свойства способствовали получению при резании чисто сливных стружек.

Резание осуществлялось на токарно-винторезном станке „Hasse Wrede“, резцом с напаянной пластинкой твердого сплава Т15К6. Для получения корней стружек использовался метод мгновенной остановки процесса резания при помощи приспособления „падающий резец“. Резцом с передним углом $\gamma = +8^\circ$, с вспомогательной режущей кромкой, расположенной параллельно подаче, при $s = 2,40$ мм/об и $t = 1$ мм был получен корень обратной стружки. Полученный корень стружки был заплавлен в баббит, и затем в трех параллельных плоскости схода стружки, сечениях были приготовлены продольные шлифы. На всех трех шлифах была отчетливо видна граница перехода обрабатываемого материала в стружку в виде очень тонкой, узкой зоны, начинающейся от режущей кромки и проходящей до точки перехода обрабатываемой поверхности во внешнюю поверхность стружки.

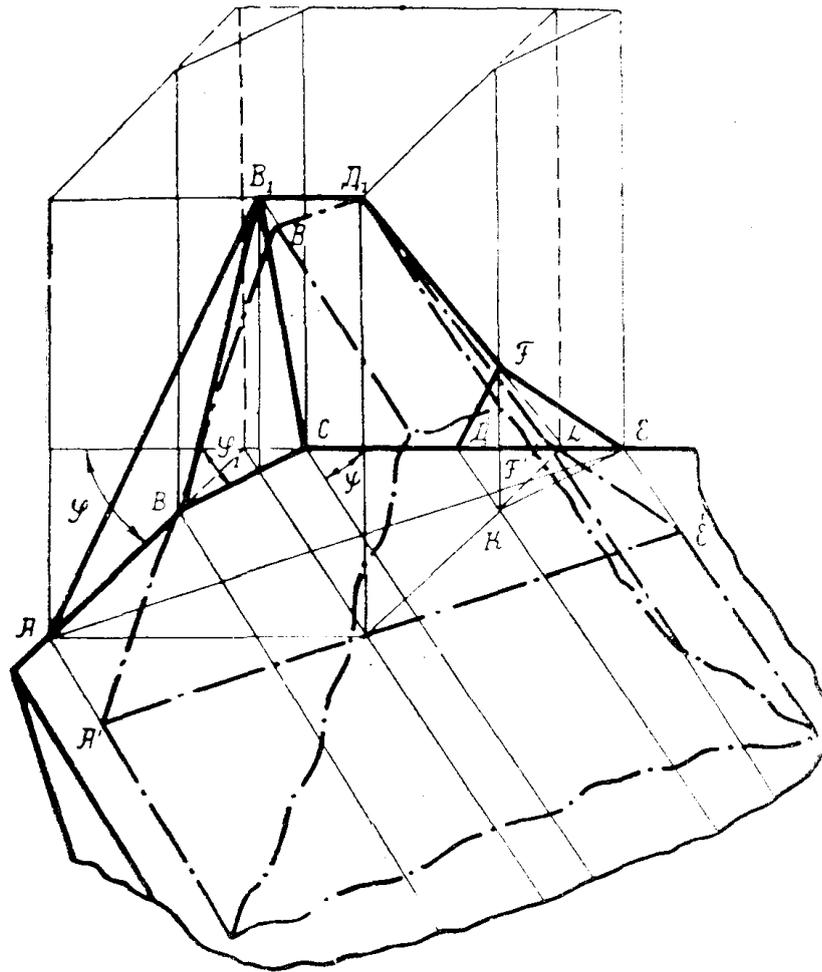
Анализ таких шлифов позволяет считать зону деформации плоскостью или поверхностью.

Измеренные на всех шлифах углы β_1 во всех сечениях оказались равными 15° . Можно предположить, что именно в плоскостях, параллельных плоскости схода стружки, происходят сдвиги, в результате которых образуется текстура стружки, причем эти сдвиги происходят в одинаковых направлениях в любом сечении стружки. Это доказывается не только равенством углов β_1 в любом продольном, параллельном плоскости схода стружки сечении, а также еще следующим опытом.

Если предположить, что сдвиги в зоне деформации происходят в разных направлениях в зависимости от конфигурации режущих кромок, то очевидно отдельные зерна в стружке будут по разному ориентированы, и тогда на шлифе поперечного сечения стружки это можно будет обнаружить. Был проведен специальный опыт. На тяжелом станке (мощность мотора главного привода 40 квт) была снята толстая равнобокая стружка резцом с двумя режущими кромками. Стружка была снята при $s = 4,2$ мм/об, $t = 3,70$ мм и $v = 75$ м/мин с болванки из стали 12 ХНЗА. На этом режиме стружка получилась сливной, с едва заметными на боковых сторонах следами отдельных элементов. Поперечное сечение стружки равнялось приблизительно 19 мм². Был приготовлен шлиф поперечного сечения этой стружки, на котором после травления 5 % раствором азотной кис-

лоты обозначилась текстура. Изучение текстуры привело к выводу о равномерности и одинаковой ориентированности зерен по всему поперечному сечению стружки.

Считая, что зону деформации можно представить в виде поверхности, состоящей из нескольких плоскостей в случае несвободного резания, и что форма поверхности сдвига определяется конфигурацией режущих кромок резца и связана с формой поперечного сечения стружки, нетрудно представить процесс образования стружки при резании резцом с переходной режущей кромкой, расположенной под углом φ' к направлению подачи. Схема такого процесса представлена на фиг. 4.



Фиг. 4

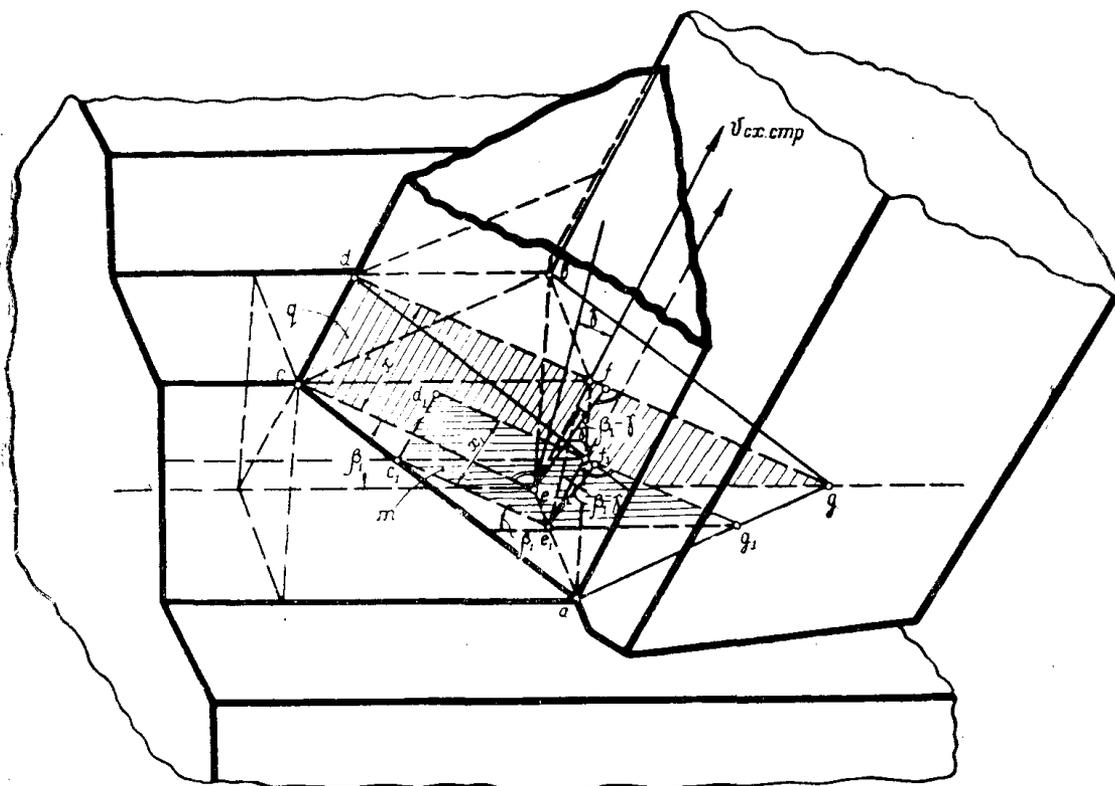
Как следует из схемы, форма поверхности сдвига в этом случае получается довольно сложной и состоит из 4 пересекающихся плоскостей: на главной режущей кромке— ΔAB_1B , на переходной режущей кромке— ΔBB_1C и на вспомогательной режущей кромке—многоугольник CB_1D_1FD и ΔDFE .

Определение относительного сдвига

Из рассмотренных схем процесса образования равнобокой и обратной стружек, в основе которых лежит положение о том, что сдвиги в отдельных, параллельных плоскости схода стружки, плоскостях происходят в одинаковом направлении и что поэтому углы β_1 в этих плоскостях одинаковы, можно сделать вывод о том, что и относительные сдвиги в этих сечениях будут одинаковыми, а их подсчет можно производить по обыч-

ной методике [2]. Для доказательства этого обратимся к фиг. 5, на которой представлен корень равнобокой стружки.

На этой фигуре q — плоскость схода стружки, m — плоскость в сечении параллельном плоскости схода стружки, $acbea$ — поверхность сдвига. Плоскости m и q при пересечении с поверхностью сдвига образуют линии направления сдвигов, наклоненные под одинаковым углом β_1 к направлению движения резания. Так как основная часть деформации стружки получается в очень узкой зоне деформации, которую можно принять за поверхность $acbea$, то тогда в сечении q линией максимальных сдвигающих напряжений можно считать линию ce . Положение этой линии определяется углом β_1 . Выделим в этом сечении некоторый объем металла шириной x , в виде очень тонкой пластинки, расположенной в этой плоскости, в форме параллелограмма $cdfe$. До деформации этот параллелограмм занимал положение $cfge$, причем точка f лежала на ребре cf обрабатываемой поверхности. В процессе образования стружки точка f переместилась в точку d , лежащую на внешнем гребне стружки, а точка g переместилась в точку e . Тогда относительный сдвиг в данном тонком сечении будет $\varepsilon = \frac{A}{x}$, где A — длина линии ce , или df или fg .



Фиг. 5

$$A = x \cdot \operatorname{ctg} \beta_1 + x \cdot \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma), \quad \text{откуда}$$

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma).$$

То же самое можно получить и в сечении m :

$$\varepsilon_1 = \frac{B}{x_1}, \quad \text{где } B \text{ — длина линии } c_1 l_1, \text{ или } d_1 f_1, \text{ или } f_1 g_1.$$

$$B = x_1 \cdot \operatorname{ctg} \beta_1 + x_1 \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma), \quad \text{откуда}$$

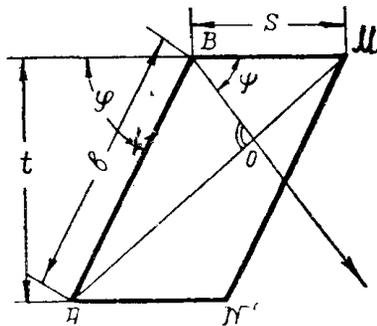
$$\varepsilon_1 = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma).$$

Следовательно, в сечении $m \varepsilon_1 = \varepsilon$. Это можно получить так же и в любом другом сечении, параллельном плоскости схода стружки.

Следовательно, для определения относительного сдвига ε необходимо знать угол β_1 и передний угол резца.

Направление схода стружки по передней грани резца

Направление схода стружки по передней грани резца, определяющее положение плоскости схода стружки и, следовательно, определяющее возможность подсчета угла β_1 , в значительной степени зависит от режимов резания s и t , а также от конфигурации режущих кромок резца. Если исходить из относительной роли участия каждой режущей кромки резца в процессе резания, то направление схода стружки по передней грани резца определится следующим образом.



Фиг. 6

Назовем углом схода стружки ψ угол между проекцией направления движения стружки по передней грани резца на основную плоскость и направлением подачи, и определим этот угол для простейшего случая обычного резания резцом с передним углом $\gamma = 0^\circ$, с двумя режущими кромками, одна из которых расположена под углом $\varphi = 0^\circ$ (фиг. 6).

Ранее указывалось, что при резании пластины было замечено, что направление схода стружки во всех случаях оказывается близким перпендикулярному к диагонали площади среза. Если исходить из относительной роли режущих кромок в процессе резания, то направление схода стружки должно быть перпендикулярным диагонали площади среза, в данном случае— AM . Тогда простейшие тригонометрические вычисления дадут:

$$BO = s \cdot \cos \psi; \quad BO = b' \cdot \cos (180^\circ - \varphi - \psi); \quad \text{отсюда:}$$

$$s \cdot \cos \psi = b' \cdot \cos (180^\circ - \varphi - \psi).$$

Поделим обе части уравнения на b' :

$$\frac{s}{b'} \cos \psi = \cos \left[(180^\circ - \varphi) - \psi \right],$$

$$\frac{s}{b'} = \frac{\cos (180^\circ - \varphi) \cos \psi}{\cos \psi} + \frac{\sin (180^\circ - \varphi) \sin \psi}{\cos \psi} = -\cos \varphi + \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \psi;$$

$$\frac{s}{b'} \sin \varphi + \cos \varphi = \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \psi; \quad \text{но } b' = \frac{t}{\sin \varphi}, \quad \text{тогда:}$$

$$\frac{s}{t} \sin \varphi + \cos \varphi = \sin \varphi \cdot \operatorname{tg} \psi.$$

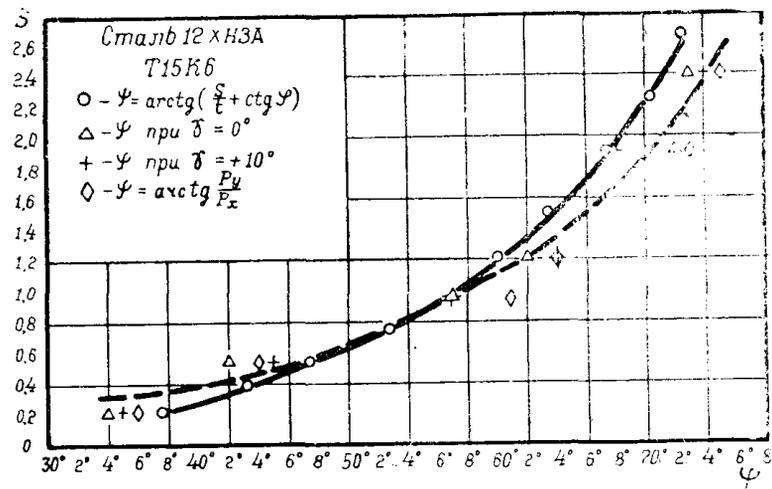
Поделим все члены уравнения на $\sin \varphi$ и получим:

$$\frac{s}{t} + \operatorname{ctg} \varphi = \operatorname{tg} \psi, \quad \text{откуда окончательно:}$$

$$\psi = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{s}{t} + \operatorname{ctg} \varphi \right).$$

Нетрудно получить то же самое для обратной и равнобокой стружки, когда $s \gg t$.

Полученная зависимость была проверена экспериментально при резании стали 12ХНЗА резцом с двумя режущими кромками. Опыты проводились на станке ДИП-300, резцами с $\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 0^\circ$ при постоянной глубине резания $t = 1 \text{ мм}$ и различных подачах $s = 0,21 \div 2,40 \text{ мм/об.}$ Результаты опытов представлены на фиг. 7.



Фиг. 7

Сплошной линией на этом графике показана теоретическая зависимость, пунктирной — результаты опытов. Каждая опытная точка представляет собою среднее значение в серии из 10—12 опытов при разных скоростях резания от 30 до 120 м/мин. На этом же графике представлены углы схода стружки, подсчитанные по соотношению составляющих силы резания $\frac{P_y}{P_x}$, измеренных гидравлическим динамометром, и углы схода стружки

при $\gamma = +10^\circ$, если этот угол затачивать на резце не от той или иной режущей кромки, а в направлении схода стружки. В этих опытах до подачи $s = 1,15 \text{ мм/об}$ получались обычные стружки, а при больших подачах — обратные.

Как следует из графика, результаты опытов отклоняются от теоретической кривой максимум на 6%, причем при обычных стружках в сторону уменьшения, а при обратных стружках в сторону увеличения ψ . Видимо, несколько сказывается привалирующее влияние той режущей кромки, которая выполняет большую роль в процессе резания. Однако, такая небольшая разница в практических расчетах не даст большой ошибки.

Очень важно, что углы схода стружки, подсчитанные по соотношению составляющих сил резания $\frac{P_y}{P_x}$ очень близки к измеренным в опыте. Это

свидетельствует о том, что процесс деформации определяет величину и направление равнодействующей силы резания, а расположение ее направления в плоскости схода стружки (о чем свидетельствуют результаты опытов), позволяет производить расчет сил резания в горизонтальной плоскости P_x и P_y по углу схода стружки ψ .

Следует так же указать, что передний угол γ не влияет на угол схода стружки, если он будет заточен на резце в направлении схода стружки.

Несколько изменится формула для подсчета угла схода стружки в случае резания резцом с переходной режущей кромкой. В этом случае

направление схода стружки так же остается перпендикулярным диагонали площади среза. Аналогичные предыдущим тригонометрические вычисления приводят к следующей формуле для подсчета угла схода стружки ψ в этом случае:

$$\psi = \arctg \left[\operatorname{tg} \varphi \left(1 - \frac{a}{t} \sin \varphi' \right) + \frac{a}{t} \cos \varphi' + \frac{s}{t} \right], \text{ где:}$$

- φ — главный угол в плане,
- φ' — угол в плане переходной режущей кромки,
- s — подача,
- t — глубина резания,
- a — длина переходной режущей кромки.

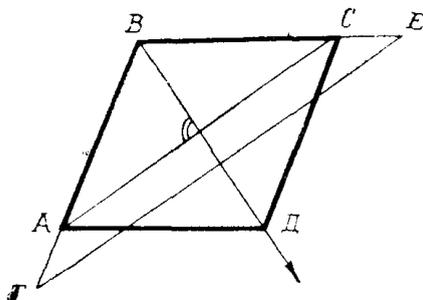
Таким же образом можно определять углы схода стружки при самой разнообразной геометрии передней грани режущего инструмента.

Уширение стружки

Снятая в процессе обычного резания стружка оказывается, как правило, шире, чем ширина среза, то есть деформация стружки происходит и в направлении по ширине стружки. Это же самое должно иметь место и в процессе силового резания. Но, если при обычном резании ширина среза и ширина стружки являются понятиями вполне определенными, то в процессе силового резания, особенно когда стружка получается равнобокой, понятие ширины стружки и среза, а также и самого процесса уширения оказывается неопределенным. Действительно, что же считать за ширину стружки, которая в поперечном сечении представляет трапецию или треугольник? Или, что считать за ширину среза, если сечение срезаемого слоя представляет собой параллелограмм или ромб?

Рассмотрим случай образования равнобокой стружки при резании резцом с $\gamma = 0^\circ$ и обратимся для этого к фиг. 2. Площадь среза в этом случае является ромб $ABCD$ с диагональю AC . Можно допустить, что при резании металл должен уширяться равномерно во всех свободных направлениях, пропорционально толщине слоя в соответствующем направлении, причем при резании это уширение будет максимальным у нижнего основания стружки и исчезающим по мере приближения к вершине стружки D' .

В данном случае резания возможность уширения у металла имеется только в направлениях вдоль режущих кромок от вершины B , то есть в направлениях BA и BC . Следовательно, можно допустить, что уширение в направлении BA будет равно отрезку AF , пропорциональному BA (фиг. 8), а в направлении BC равно отрезку CE , пропорциональному длине режущей кромки BC .



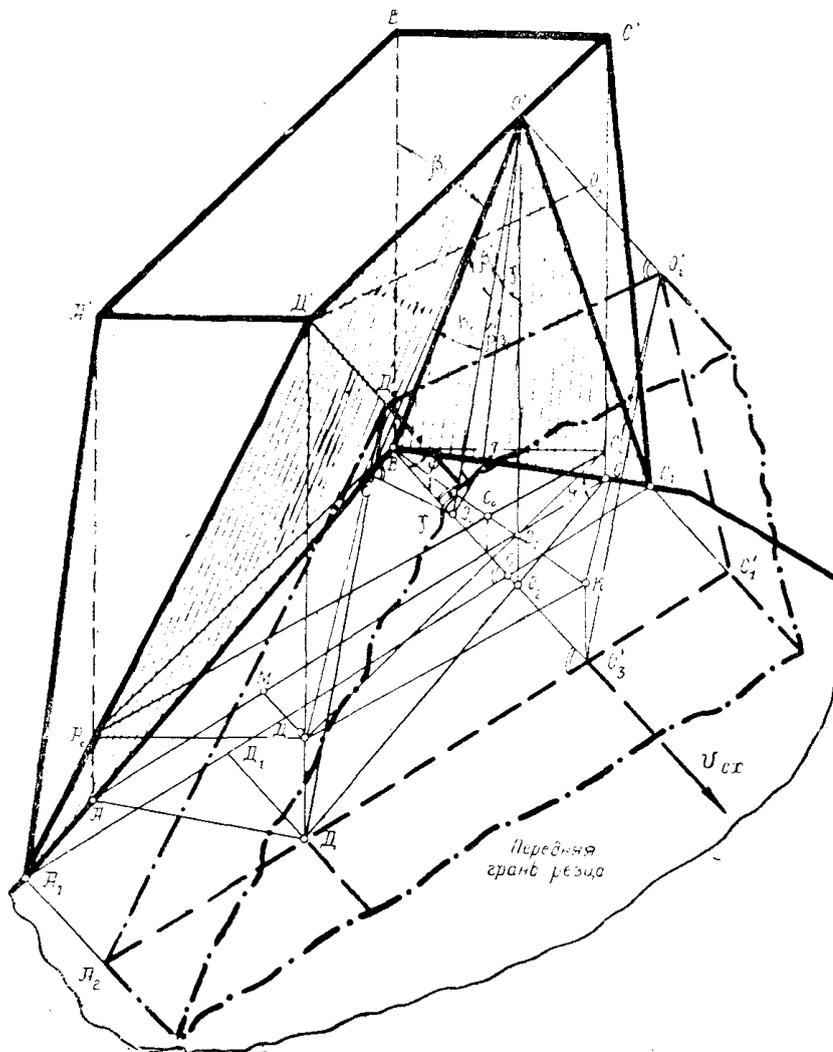
Фиг. 8

Нетрудно представить, что отношения $\frac{BF}{BA} = \frac{BE}{BC} = \frac{FE}{AC} = \zeta_b$,

(где ζ_b — уширение стружки, всегда > 1); то есть уширением в любом случае можно считать отношение ширины основания реальной стружки, которую легко измерить на стружке, к диагонали площади среза, подсчитываемой из данных режимов резания s , t и геометрии передней грани резца.

Определение угла β_1 и площади поверхности сдвига

Учитывая основные положения, рассмотренные в предыдущих разделах, процесс образования обычной стружки при резании двухкромочным резцом с положительным передним углом γ можно схематично представить, как показано на фиг. 9. На этой фигуре заштрихованные плоскости образуют поверхность сдвига, сплошной толстой линией показан срезаемый слой, а штрихпунктирной линией—часть сходящей по передней грани резца стружки трапециевидального сечения. При режимах силового резания во всех случаях стружка получается весьма значительных размеров, поэтому без существенной ошибки у такой стружки можно измерить ширину нижнего основания A_1C_1 или A_2C_1 и ее высоту O_1O' или $O_3'O_1'$. Обозначим $A_1C_1 = b$, а $O_1O' = a_1$. Зная эти размеры, а также s , t , φ , γ оказывается возможным геометрически определить угол β_1 и площадь поверхности сдвига Q , имеющие место при данном режиме резания.



Фиг. 9

В соответствии с имеющимися на фиг. 9 обозначениями вывод формул можно представить коротко в следующем порядке:

$$\beta_1 = \beta_1' + \gamma;$$

$$\beta_1' = \frac{BO_1}{a_1}; \quad BO_1 = BO_2 - O_1O_2; \quad O_1O_2 = a_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma; \quad BO_2 = \frac{BO_2'}{\cos \gamma}.$$

Из $\Delta BO_2'C_0$: $BO_2' = \frac{s}{\sin \psi (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi)}$ и тогда:

$$BO_1 = \frac{s}{\sin \psi \cdot \cos \gamma \cdot (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi)} - a_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma, \text{ окончательно:}$$

$$\operatorname{tg} \beta_1' = \frac{s}{a_1 \cdot \sin \psi \cdot \cos \gamma \cdot (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi)} - \operatorname{tg} \gamma.$$

Таким образом, определяется угол β_1 . Для дальнейших выкладок понадобятся углы β_2' и β_3' . Формулы для определения получаются весьма просто

$$\operatorname{tg} \beta_2' = \frac{EO_1}{a_1}; \quad EO_1 = BO_1 \cdot \sin(\varphi + \psi), \quad \text{тогда}$$

$$\operatorname{tg} \beta_2' = \frac{BO_1 \cdot \sin(\varphi + \psi)}{a_1} = \operatorname{tg} \beta_1' \cdot \sin(\varphi + \psi).$$

$$\operatorname{tg} \beta_3' = \frac{FO_1}{a_1}; \quad FO_1 = BO_1 \cdot \sin \psi, \quad \text{тогда}$$

$$\operatorname{tg} \beta_3' = \frac{BO_1 \cdot \sin \psi}{a_1} = \operatorname{tg} \beta_1' \cdot \sin \psi.$$

Выведем теперь уравнения для подсчета площади поверхности сдвига Q .

$$Q = Q_{A_1D'O'B} + Q_{BO'C}.$$

$$Q_{A_1D'O'B} = \frac{A_1B + D'O'}{2} EO'; \quad A_1B = AB \cdot \zeta_b.$$

Если предположить, что $\angle A_0BA \cong \angle C_0BC \cong \gamma$, то

$$AB = \frac{A_0B}{\cos \gamma} = \frac{b'}{\cos \gamma} = \frac{t}{\sin \varphi \cdot \cos \gamma}; \quad A_1B = \frac{t \cdot \zeta_b}{\sin \varphi \cdot \cos \gamma}.$$

$$D'O' = DO_2 = DC - O_2C; \quad DC = AB = \frac{t}{\sin \varphi \cdot \cos \gamma}.$$

$$\text{Из } \Delta BO_2C: O_2C = \frac{s}{\sin \varphi \cdot \cos \psi (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi)},$$

и тогда

$$D'O' = \frac{t}{\sin \varphi \cdot \cos \gamma} - \frac{s}{\sin \varphi \cdot \cos \gamma (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi)}; \quad EO' = \frac{a_1}{\cos \beta_2'}.$$

Тогда окончательно получим:

$$Q_{A_1D'O'B} = \left[t(\zeta_b + 1) - \frac{s}{(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi)} \right] \frac{a_1}{2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \beta_2'}.$$

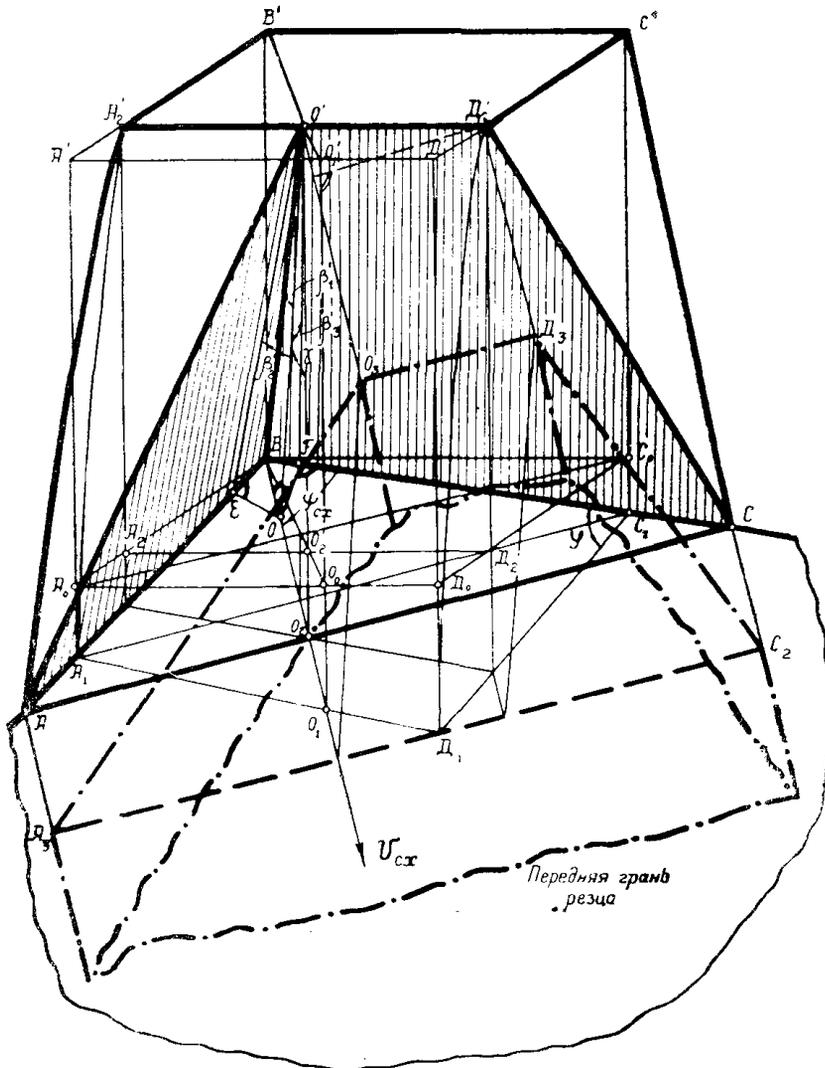
Площадь треугольника $BO'C$ определится просто

$$Q_{BO'C} = \frac{BC_1 \cdot FO_1}{2}; \quad BC_1 = \frac{s \cdot \zeta_b}{\cos \gamma}; \quad FO_1 = \frac{a_1}{\cos \beta_3'};$$

$$Q_{BO'C} = \frac{s \cdot a_1 \cdot \zeta_b}{2 \cdot \cos \gamma \cdot \cos \beta_3'}$$

Формула для определения общей площади поверхности сдвига после подстановки и преобразований получится:

$$Q = \frac{a_1}{2 \cos \gamma} \left\{ \frac{1}{\sin \varphi \cdot \cos \beta_2'} \left[t(\zeta_b + 1) - \frac{s}{(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi)} \right] + \frac{s \cdot \zeta_b}{\cos \beta_3'} \right\}$$



Фиг. 10

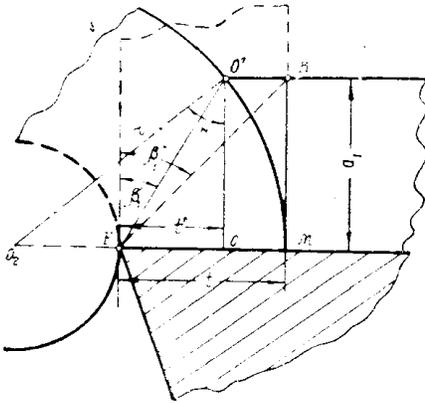
Аналогичным образом выводятся и зависимости для обратной стружки. Схема образования такой стружки представлена на фиг. 10, а окончательный вид формул будет следующий: $\beta_1 = \beta_1' + \gamma$;

$$\operatorname{tg} \beta_1' = \frac{t^1}{a_1 \cdot \sin \psi \cdot \cos \gamma} - \operatorname{tg} \gamma ;$$

$$\operatorname{tg} \beta_2' = \operatorname{tg} \beta_1' \cdot \sin (\varphi + \psi) ;$$

$$\operatorname{tg} \beta_3' = \operatorname{tg} \beta_1' \cdot \sin \psi;$$

$$Q = \frac{a_1}{2 \cos \gamma} \left\{ \frac{1}{\sin \varphi} \left[\frac{t \cdot \zeta_b}{\cos \beta_2'} - \frac{t' \cdot \sin (\varphi + \psi)}{\sin \psi \cdot \cos \beta_3'} \right] + \frac{s (\zeta_b + 1)}{\cos \beta_3'} \right\}.$$



Фиг. 11

В этих формулах t' —размер, учитывающий влияние радиуса обрабатываемой детали на положение границы перехода срезаемого слоя $O'D_2'$ в стружку. Схематично это представлено на фиг. 11, из которой видно, что если бы срезаемый слой не имел кривизны, то линия перехода обрабатываемой поверхности в стружку спроектировалась бы в точку K , а не в точку O' , как получается на самом деле. Из этой фиг. очень просто определяется t'

$$t' = r \cdot \sin \left(\arccos \frac{a_1}{r} \right) - (r - t).$$

Таким образом по внешним параметрам стружки и режиму резания подсчитывается угол β_1 и площадь поверхности сдвига при силовом резании резцом без переходной режущей кромки. В случае образования равнобокой стружки можно пользоваться формулами как для обычной, так и для обратной стружки.

Определение продольной усадки стружки

В настоящее время продольная усадка стружки ζ_e подсчитывается из отношения длины среза к длине снятой стружки $\frac{l_0}{l_1}$, исходя из равенства объемов срезаемого слоя и стружки, вес которых будет одинаков. Вес срезаемого слоя можно выразить формулой: $G = l_0 \cdot s \cdot t \cdot d_{y0}$ где:

G — вес срезаемого слоя,
 l_0 — длина срезаемого слоя,
 d_{y0} — удельный вес обрабатываемого металла.

Отсюда можно узнать длину среза $l_0 = \frac{G}{s \cdot t \cdot d_{y0}}$ мм. Вес G находится взвешиванием снятой стружки.

Следовательно, продольная усадка стружки будет

$$\zeta_e = \frac{l_0}{l_1} = \frac{G}{e_1 \cdot s \cdot t \cdot d_{y0}}, \quad \text{где:}$$

l_1 — длина снятой стружки.

Но для определения угла β_1 нужно знать не продольную усадку стружки, а усадку по толщине, то есть $\frac{a_1}{a_0}$, где a_1 — толщина стружки, а a_0 — толщина среза, иначе нужно ввести поправку на уширение стружки.

Допустим, объем срезаемого слоя будет $v = l_0 \cdot a_0 \cdot b_0$ мм³, а объем стружки $v = l_1 \cdot a_1 \cdot b_1$, где

b_0 — ширина срезаемого слоя,
 b_1 — ширина стружки.

Тогда $l_o \cdot a_o \cdot b_o = l_1 \cdot a_1 \cdot b_1$ и если $\frac{b_1}{b_o} = \zeta_b > 1$ (уширение), то $\frac{a_o}{a_1} = \frac{l_o}{l_1 \cdot \zeta_b} = \frac{\zeta_e}{\zeta_b}$, иначе говоря, усадка по толщине будет меньше продольной усадки на величину уширения стружки ζ_b .

$$\text{Тогда } \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\frac{a_1}{a_o} - \sin \gamma} = \frac{\cos \gamma}{\frac{\zeta_e}{\zeta_b} - \sin \gamma}.$$

Таким образом, определяется продольная усадка стружки и угол β_1 в случае обычного несвободного резания, когда подача значительно меньше глубины резания.

При резании резцом с двумя режущими кромками толщина среза a_o и толщина стружки a_1 получают неопределенное выражение, так как они являются переменными в разных продольных сечениях, хотя их отношение $\frac{a_1}{a_o}$ остается постоянным. Поэтому очевидно, что данная методика определения продольной усадки стружки при силовом резании будет формальной, не отражающей действительной картины процесса.

Выше указывалось, что углы β_1 в разных продольных сечениях стружки при резании на больших подачах будут одинаковыми и была дана методика подсчета этих углов при резании двухкромочным резцом. Зная угол β_1 можно определить отношение $\frac{a_1}{a_o}$, которое в любом сечении стружки также будет одинаково, по формуле:

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\frac{a_1}{a_o} - \sin \gamma}, \quad \text{откуда } \frac{a_1}{a_o} = \frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \beta_1} + \sin \gamma.$$

Это второй вариант подсчета продольной усадки стружки.

Наконец, из представленных схем деформации можно получить третий вариант формулы для определения ζ_l . Если продольная усадка стружки есть отношение поперечного сечения стружки к поперечному сечению среза, то для обычной стружки можно написать:

$$\zeta_l = \frac{\text{поперечное сечение стружки}}{s \cdot t} = \frac{\text{пл. } A_2 D' O_1' C_1'}{s \cdot t} \quad (\text{фиг. 9})$$

или $\zeta_l = (A_1 C_1 + D_1' O_1' \frac{O_3' O_1'}{2 \cdot s \cdot t})$, здесь: $A_1 C_1 = b_1$ (ширине стружки), а $O_3' O_1' = O_1 O' = a_1$ (толщине стружки). В результате некоторых дополнительных построений и тригонометрических выкладок можно определить $D_1 O_1'$ как:

$$D_1 O_1' = \frac{\sin(\varphi + \psi)}{\sin \varphi} \left[t - \frac{s}{(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi)} \right],$$

тогда:

$$\zeta_l = \left\{ b_1 + \frac{\sin(\varphi + \psi)}{\sin \varphi} \left[t - \frac{s}{(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \psi)} \right] \right\} \frac{a_1}{2 \cdot s \cdot t}.$$

Необходимо иметь в виду, что здесь:

- b_1 — ширина стружки, мм,
- a_1 — толщина стружки, мм,
- s — подача, мм/об,
- t — глубина резания, мм,
- φ — угол в плане,
- ψ — угол схода стружки по передней грани.

Величины a_1 и b_1 могут быть измерены на самой стружке штангенциркулем с достаточной точностью, если будут спилены заусеницы и гребешки на половину их величины.

Аналогично можно получить выражение для определения продольной усадки обратной стружки:

$$\zeta_t = \left\{ b_1 + \left[s - \frac{t^1 \cdot \sin(\varphi + \psi)}{\sin \varphi \cdot \sin \psi} \right] \sin \psi \right\} \frac{a_1}{2 \cdot s \cdot t}.$$

Для равнобокой стружки применимы обе формулы.

Была проведена экспериментальная проверка усадок стружки, подсчитанных по всем трем вариантам при резании стали 12 ХНЗА. Резец из твердого сплава Т15К6 имел геометрию: $\varphi = 60^\circ$, $\varphi_1 = 0^\circ$, $\gamma = +10^\circ$. Глубина резания во всех опытах была 1 мм, а подачи имели значения 0,21—1,20—2,40 мм/об, то есть получались обычные, равнобокие и обратные стружки.

Результаты опытов сведены в табл. I. Как следует из таблицы, есть некоторая разница в усадках, подсчитанных по разным вариантам. Так усадка, подсчитанная по весу стружки для обратных стружек, несколько меньше, чем по формулам. Это объясняется, видимо, ошибкой при подсчете усадки по весу, ибо на всех стружках все-таки были заметны следы отдельных элементов, что указывает на нечисто сливной характер стружки, у которой при несколько большей длине получается меньшая усадка.

Таблица I

Наименование стружки и подача, мм/об	Скорость резания, м/мин	I Усадка, подсчитанная обычным способом по весу стружки	II Усадка, подсчитанная по углу β_1	III Усадка, подсчитанная по формулам
Обратная $s = 2,40$ мм/об	85,5	1,96	2,20	2,06
	55,3	2,10	2,31	2,17
	36,8	2,16	2,35	2,24
	30,6	2,35	2,73	2,56
	24,6	2,55	3,13	3,02
	17,2	2,90	3,37	2,93

Наименование стружки и подача, мм/об	Скорость резания, м/мин	I Усадка, подсчитанная обычным способом по весу стружки	II Усадка, подсчитанная по углу β_1	III Усадка, подсчитанная по формулам
Равнобокая $s = 1,20$ мм/об	90	2,22	1,71	$\frac{1,76}{1,82}$
	68,5	2,30	1,83	$\frac{1,94}{2,06}$
	30,5	2,74	2,58	$\frac{2,70}{2,73}$
	17,5	2,80	2,80	$\frac{2,94}{2,87}$
	110	2,10	1,62	$\frac{1,75}{1,86}$
	153	1,87	1,51	$\frac{1,61}{1,69}$

Примечание: Для равнобокой стружки дробью указано: в числителе ζ_1 , подсчитанные по формуле для обычной стружки, в знаменателе—по формуле для обратной стружки.

Но эта разница невелика и результаты можно считать удовлетворительно совпадающими. Несколько большая разница получается в усадках равнобоких стружек, подсчитанных по I или II и III вариантам, причем II и III варианты отличаются весьма незначительно.

Заключение

1. Процессы образования стружки при силовом резании можно представить проходящими путем сдвигов в отдельных слоях металла при прохождении их через зону деформации.

2. Зона сдвигов, являющаяся зоной максимальных касательных напряжений, представляет собой очень узкую область, которую в случае резания резцом с несколькими режущими кромками можно представить в виде части боковой поверхности пирамиды или усеченной пирамиды, построенной на режущих кромках резца.

3. Поверхность сдвига имеет вполне определенную форму в соответствии с конфигурацией режущих кромок инструмента и направление, характеризующее одинаковыми углами β_1 в разных продольных сечениях стружки, параллельных плоскости схода стружки, что обуславливает равенство усадки стружки в этих сечениях.

4. Форма поверхности сдвига определяет поперечное сечение стружки и направление схода стружки по передней грани резца, которое в общем случае может быть принято перпендикулярным диагонали площади среза.

5. Относительные сдвиги ϵ при образовании обычной равнобокой и обратной стружек можно подсчитывать по обычной методике.

6. Представленные схемы деформации позволяют определить угол β_1 и площади поверхности сдвига по внешним параметрам стружки и режимам резания.

7. Оказывается возможным подсчет продольной усадки стружки по трем предложенным вариантам.

8. Уширением стружки в любом случае является отношение нижнего основания поперечного сечения стружки к диагонали сечения среза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоладзе Т. Н. Стружкообразование при резании металлов. Машгиз, 1 52.
 2. Розенберг А. М. и Еремин А. Н. Пластическая деформация стружки при резании металлов, Известия Томского политехнического института. Том 75, 1954.
 3. Обухов П. Н. Исследование процесса силового резания сталей. Автореферат диссертации, Томск, 1955.
-