ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
Том 75 ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА 1954 г.

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СТРУЖКИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

А. М. РОЗЕНБЕРГ и А. Н. ЕРЕМИН

При обработке резанием пластичных металлов на металлорежущих станках резцами, сверлами, фрезами и другими металлическими режущими инструментами наблюдается заметная пластическая деформация обработанной инструментом поверхности, непосредственно связанная с чистотой, гладкостью и качеством обработанной поверхности. Стружка, снятая режущим инструментом, сама оказывается очень значительно пластически деформированной. Хотя стружка сама по себе в процессе механической обработки металлов в производстве не представляет для нас интереса, являясь отходом при изготовлении тех или иных деталей, но степень ее пластической деформации непосредственно связана с расходуемой на процесс резания работой, с силой резания, возникающей на режущем инструменте, с количеством выделяющегося при резании тепла, а значит и с нагревом, износом и стойкостью режущего инструмента. Поэтому при исследовании процессов резания важно уметь определять степень пластической деформации снятой стружки, и многие исследования последнего времени показывают, что ряд явлений процесса резания может быть физически объяснен при учете степени пластической деформации стружки.

Под степенью пластической деформации стружки исследователи обычно понимают усадку стружки, называя усадкой отношение пройденного резцом пути к длине стружки, снятой на этом пути. При этом усадка стружки выражается отвлеченным числом, которое всегда больше единицы. Считается, что если бы усадка была равна единице, то в этом случае пластическая деформация в стружке отсутствовала бы, так как ее длина в этом случае была бы равна длине пути, на котором она снята. Некоторые исследователи усадку стружки выражают обратным отношением, т. е. отношением длины стружки к длине пути резца. При таком обозначении усадка принимает значение правильной дроби, которая тем меньше, чем больше деформирована стружка, причем опять таки считается, что при отсутствии деформации усадка и в этом случае будет равна единице.

Усадка стружки, несомненно, является выражением степени деформации стружки, и мы в одной из наших работ показали, что изменение усадки стружки всегда влечет за собой изменение силы резания, являющейся функцией степени деформации стружки. Но неправильно думать, что усадка стружки численно выражает степень пластической деформации металла стружки, неправильно считать, что при усадке, равной единице, пластическая деформация в стружке отсутствует, а также неверно принимать, что при различных углах резания инструмента и при одинаковых усадках стружки степень пластической деформации стружки будет одна и та же. Это мы покажем в дальнейшем изложении.

Будем называть усадкой стружки отношение

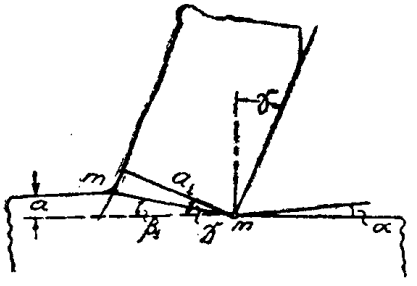
$$\zeta = \frac{l_0}{l},$$

где ζ — усадка стружки,

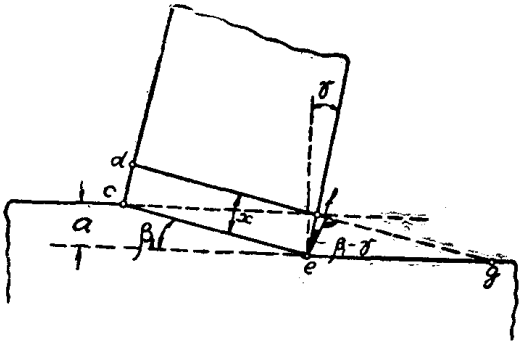
l_0 — путь, пройденный резцом при снятии данной стружки,

l — длина стружки, снятой на пути l_0.

Основной и почти единственной деформацией в стружке при резании пластичного металла является деформация сжатия, протекающая путем сдвигов в плоскости максимальных сдвигающих напряжений *mm* (фиг. 1). Положение этой плоскости и ее наклон к направлению движения резца определяют при данном угле резания δ или переднем угле γ величину продольной усадки стружки ζ, а также и величину поперечного ее утолщения. Кроме продольной усадки и поперечного утолщения стружки, наблюдается еще ее уширение в направлении, параллельном главной режущей кромке резца. Деформацией уширения можно пренебречь, так как она обычно не имеет сколько-нибудь значительной величины. Таким образом, правильно будет считать, что при резании пластичного металла, так же как и при обычном сжатии под прессом, основной деформацией является сдвиг, и степень деформации должна оцениваться по величине относительного сдвига. Следует оговориться, что в действительности не может существовать такого положения, что вся деформация стружки проходит в одной единственной плоскости (плоскость максимальных сдвигающих напряжений), так как при этом скорость деформирования при любом значении скорости резания была бы бесконечно велика, что должно было бы привести к колоссальному по-



Фиг. 1



Фиг. 2

вышению напряжений и сил резания. Мы представляем себе, что пластическая деформация стружки протекает в некоторой конечной по объему зоне, расположенной впереди плоскости *mm*, как это и доказано рядом работ. Но можно предполагать, что основная часть деформации стружки получается ею в непосредственной близости к плоскости *mm*. Это предположение подтверждается рассмотрением микрофотографий сливной стружки, которые отчетливо показывают, что своеобразная строчечная структура (текстура) стружки, являющаяся результатом ее деформации, резко обрывается в достаточно узкой зоне около линии „*mm*“. Поэтому мы при определении относительного сдвига в стружке условно будем считать, что вся деформация сдвига происходит на линии максимальных сдвигающих напряжений *mm*.

Найдем связь между продольной усадкой стружки и величиной относительного сдвига ε. На фиг. 2 представлена сливная стружка, полученная при некоторой толщине снимаемого слоя „*a*“ резцом с передним углом γ. Угол сдвига β_1 определяет положение плоскости сдвига *ce*. Если мы выделим некоторый слой в стружке толщиной *x*, занимающий на боковой по-

верхности стружки площадь параллелограмма *cdef*, ограниченную с одной стороны плоскостью сдвига *ce*, а с другой стороны прямой *df* ей параллельной, то можно представить себе, что до деформации этот параллелограмм занимал положение *cfge*.

При образовании стружки точка *f*, лежавшая на внешнем контуре изделия, оказалась на внешнем контуре стружки в точке *d*, переместившись на отрезок *fd* в процессе сдвига. Подобно этому точка *g* переместилась в точку *f*. Относительный сдвиг при этом будет

$$\varepsilon = \frac{B}{x},$$

где B — длина линии *ce* или *df* или *fg*

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

Отсюда относительный сдвиг

$$\varepsilon = \operatorname{ctg}\beta_1 + \operatorname{tg}(\beta_1 - \gamma). \qquad (1)$$

Найдем связь между относительным сдвигом и усадкой стружки. Для этого воспользуемся уравнением, связывающим угол сдвига β_1 с усадкой стружки ζ

$$\operatorname{tg}\beta_1 = \frac{\cos\gamma}{\zeta - \sin\gamma}. \qquad (2)$$

Подставим выражение (2) в уравнение (1)

$$\varepsilon = \operatorname{ctg}\beta_1 + \frac{\operatorname{tg}\beta_1 - \operatorname{tg}\gamma}{1 + \operatorname{tg}\beta_1.\operatorname{tg}\gamma},$$

$$\varepsilon = \frac{\zeta - \sin\gamma}{\cos\gamma} + \frac{\dfrac{\cos\gamma}{\zeta - \sin\gamma} - \operatorname{tg}\gamma}{1 + \dfrac{\cos\gamma.\operatorname{tg}\gamma}{\zeta - \sin\gamma}}.$$

Отсюда получим

$$\varepsilon = \frac{\zeta^2 - 2\zeta\sin\gamma + 1}{\zeta.\cos\gamma}. \qquad (3)$$

Таким образом, мы получили связь между относительным сдвигом, усадкой стружки и передним углом. По уравнению (3) нами построен график (фиг. 3), по которому легко сделать следующие заключения:

а) усадка стружки в общем случае не равна относительному сдвигу и поэтому не выражает численно степень деформации металла стружки;

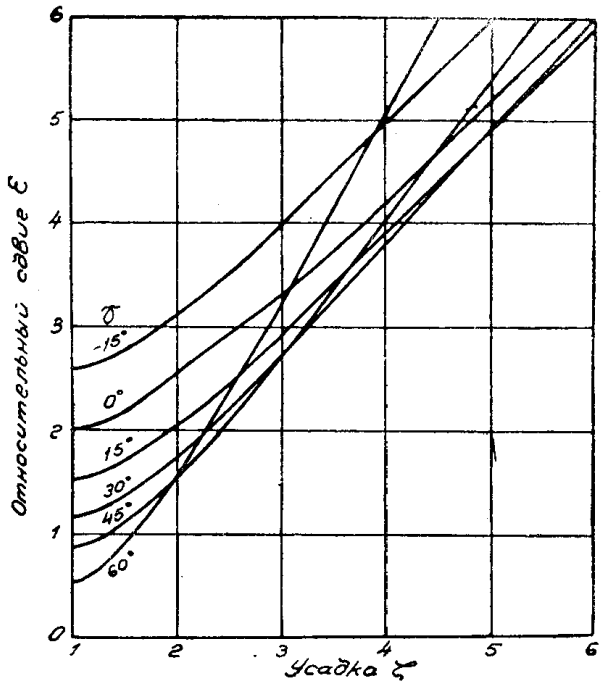
б) с увеличением усадки стружки при постоянном переднем угле относительный сдвиг, а значит и степень деформации, возрастает;

в) при разных передних углах одна и та же усадка соответствует различному и во многих случаях сильно разнящемуся относительному сдвигу. Чем меньше усадка стружки, тем больше изменение относительного сдвига с изменением переднего угла;

г) при усадке стружки, равной единице ($\zeta = 1$), относительный сдвиг не равен нулю и может достигать высоких значений. Это указывает на ошибочность представления о том, что при усадке стружки, равной единице, пластическая деформация отсутствует;

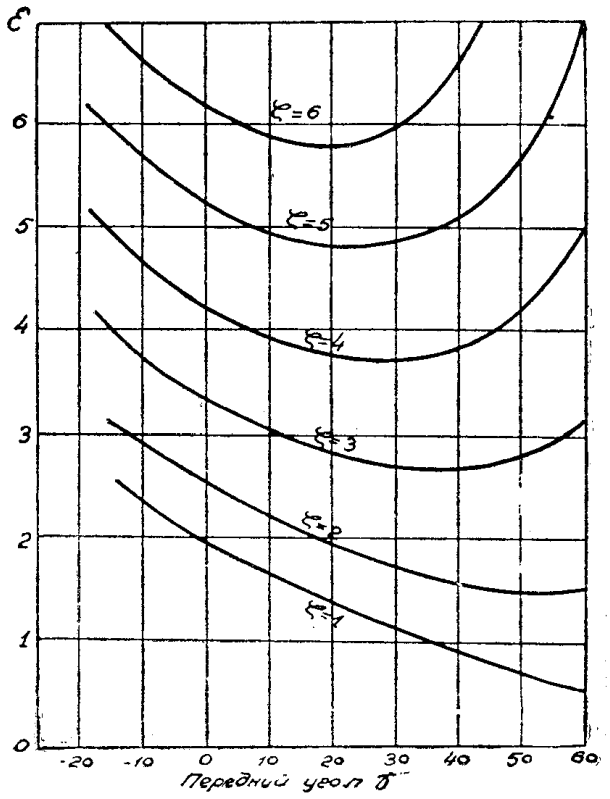
д) соотношение между значениями усадки стружки в общем случае не равно соотношению между величинами относительного сдвига. Поэтому

нельзя проводить количественное сравнение степеней пластической деформации путем сравнения усадок.



Фиг. 3

На фиг. 4 та же зависимость построена в координатах γ—ε. Это дает еще дополнительное представление о связи между усадкой стружки, передним уг-



Фиг. 4

лом и относительным сдвигом при резании. Фиг. 4 показывает, что, при условии постоянства усадки, с изменением переднего угла относительный сдвиг изменяется по кривым, имеющим минимум. Поэтому мы не имеем при постоянной усадке стружки монотонного изменения относительного сдвига с изменением переднего угла.

Угол, соответствующий наименьшему относительному сдвигу, при каждом значении усадки можно найти математически. Для этого нужно, воспользовавшись уравнением (3), взять первую производную $\frac{d\varepsilon}{d\gamma}$, приравнять ее нулю и найти величину γ

$$\frac{d\varepsilon}{d\gamma} = \frac{\zeta^2 \sin\gamma + \sin\gamma - 2\zeta}{\zeta \cos^2\gamma} = 0.$$

Отсюда

$$\sin\gamma = \frac{2\zeta}{\zeta^2 + 1}.$$

Подставляя сюда различные значения ζ, получим γ, соответствующее наименьшему относительному сдвигу. Не трудно убедиться, что эти значения γ и соответствуют наименьшим относительным сдвигам на фиг. 4. При $\zeta = 1$ наименьшему относительному сдвигу будет соответствовать $\gamma = 90°$. При этом $\varepsilon = 0$.

Таким образом, при усадке, равной единице, пластическая деформация будет отсутствовать только в единственном случае, когда передний угол $\gamma = 90°$. Этот случай практически не реален.

Представляет интерес показать, при какой усадке стружки в процессе резания будет иметь место минимальный возможный относительный сдвиг, т. е. наименьшая степень деформации стружки.

Для решения этого вопроса возьмем первую производную $\frac{d\varepsilon}{d\zeta}$,

$$\frac{d\varepsilon}{d\zeta} = \frac{1}{\cos\gamma} - \frac{1}{\zeta^2 \cos\gamma} = 0.$$

Отсюда

$$\zeta_{\varepsilon_{min}} = 1$$

и

$$\varepsilon_{min} = \frac{2 - 2\sin\gamma}{\cos\gamma}. \qquad (4)$$

Таким образом, при любом переднем угле γ наименьший относительный сдвиг имел бы место, если бы усадка стружки была равна единице. Если же представить себе случай, при котором усадка стружки была бы меньше единицы, то в этом случае относительный сдвиг и степень деформации стружки оказались бы больше, чем при $\zeta = 1$.

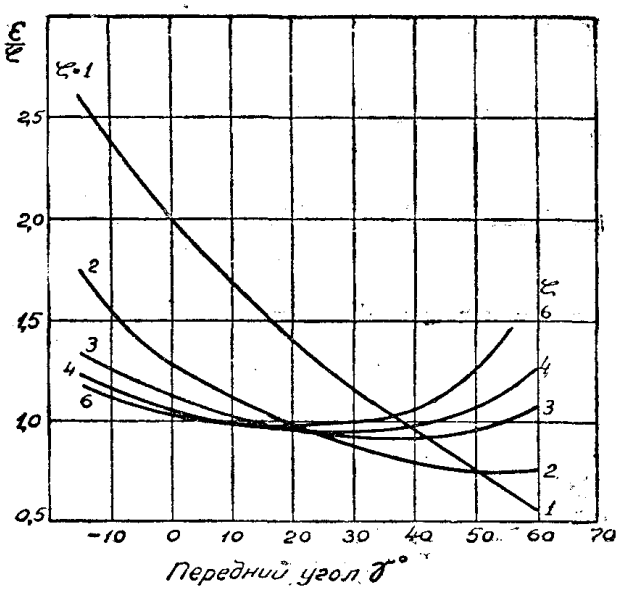
Относительный сдвиг ε имеет наименьшее значение при $\zeta = 1$, при этом степень деформации стружки имеет наименьшее значение, но и в этом случае при любой величине переднего угла $\gamma < 90°$ относительный сдвиг и степень деформации не равны нулю, как это следует из уравнения (4) и только при $\gamma = 90°$ имеет место $\varepsilon = 0$, т. е. деформация отсутствует.

На фиг. 5 показано отношение $\frac{\varepsilon}{\zeta}$ для разных γ и ζ. Из фигуры видно, что только для узкого значения передних углов в пределах 15—25° при $\zeta > 2$ отношение $\frac{\varepsilon}{\zeta} \cong 1$, т. е. $\varepsilon \cong \zeta$ и только в этом случае можно по

Ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт им. С. М. Кирова
Научно-техническая библиотека

усадке судить о степени деформации стружки. Во всех остальных случаях $\frac{\varepsilon}{\zeta} \neq 1$ и $\varepsilon \neq \zeta$.

Можно привести конкретный пример, как пользование усадкой стружки может привести к неправильным заключениям о степени деформации ее. При скоростном резании сталей в области очень высоких скоростей резания усадка стружки при отрицательном переднем угле $\gamma = -10°$ лишь на очень немного превосходит усадку при положительном угле $\gamma = +10°$. Создается впечатление, что мы получаем стружки с почти одинаковой сте-



Фиг. 5

пенью деформации. Из фиг. 4 и 5 видно, насколько это впечатление ошибочно. Пусть даже мы получили бы одинаковую усадку, но и в этом случае относительный сдвиг при $\gamma = -10°$ будет значительно больше, чем при $\gamma = +10°$. Так при $\zeta = 3$ относительный сдвиг при $\gamma = +10°$ составляет $\varepsilon = 3$, а при $\gamma = -10°$ соответственно $\varepsilon = 3{,}7$, т.е. на 23% выше.

Во всех вышеприведенных рассуждениях и выводах мы пренебрегали уширением стружки, считая, что оно несущественно и что ширина снятой стружки (b_1) равна ширине поверхности среза (b). В некоторых случаях уширение стружки бывает столь значительным, что им пренебрегать нельзя, так как это поведет к значительным ошибкам при расчете относительного сдвига. В этих случаях к расчету относительного сдвига нужно подходить следующим образом.

Уравнение для относительного сдвига

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

остается верным и при наличии уширения стружки, но угол сдвига β_1 должен быть определен с учетом уширения стружки.

Обычно угол β_1 рассчитывается по усадке стружки

$$\operatorname{tg}\beta_1 = \frac{\cos\gamma}{\zeta - \sin\gamma},$$

где ζ — продольная усадка стружки.

Считается, что продольная усадка $\frac{l_0}{l}$ равна поперечному утолщению $\frac{a_1}{a}$, что само собой вытекает из неизменяемости объема металла при снятии стружки. Но равенство продольной усадки и поперечного утолщения оказывается верным лишь при условии отсутствия уширения стружки.

Из условия неизменяемости объема металла при снятии стружки следует

$$l_0 f_0 = l f_1,$$

где f_0 — поперечное сечение снимаемого слоя металла до деформации его,
f_1 — поперечное сечение снятой стружки.

Можно считать, что при малых отношениях $\frac{a}{b}$ сечение снимаемого слоя, имевшее до деформации форму прямоугольника или параллелограмма, и в стружке, т. е. после деформации, сохранило форму прямоугольника или параллелограмма, но с увеличенной толщиной ($a_1 > a$) и с увеличенной шириной ($b_1 > b$), тогда $l_0 ab = l a_1 b_1$.

Из фиг. 1 видно, что угол β_1, определяющий собой величину относительного сдвига, при постоянном переднем угле γ зависит только от поперечного утолщения стружки. Из фиг. 1 имеем

$$\frac{a}{\sin \beta_1} = \frac{a_1}{\cos(\beta_1 - \gamma)}.$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\frac{a_1}{a} - \sin \gamma}.$$

Величину a_1 измерить непосредственно на снятой стружке затруднительно ввиду имеющихся неровностей на внутренней стороне завитка стружки. Значительно удобнее определять продольную усадку стружки $\zeta = \frac{l_0}{l}$. При наличии уширения стружки мы должны приравнять

$$\frac{a_1}{a} = \frac{l_0}{l} \cdot \frac{b}{b_1} = \zeta \frac{b}{b_1}.$$

Тогда будем иметь

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\frac{b}{b_1} \zeta - \sin \gamma}. \qquad (5)$$

Определив β_1 по уравнению (5) и подставив его в (1), получим величину относительного сдвига. Если выразить относительный сдвиг через продольную усадку, то будет получено следующее уравнение

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{b}{b_1} \zeta\right)^2 + 2 \frac{b}{b_1} \zeta \sin \gamma + 1}{\frac{b}{b_1} \zeta \cos \gamma}. \qquad (6)$$

В том случае, когда толщина снимаемого слоя „a" приближается по своей величине или равна ширине снимаемого слоя „b", поперечное сечение снятой стружки не будет представлять собой ни прямоугольника, ни параллелограмма. В этом случае оно обычно имеет форму трапеции с выпуклым меньшим основанием. Здесь величина a_1, β_1 и ε будут переменны по ширине стружки. Средние значения β_1 и ε могут быть рассчитаны по некоторой средней толщине a_1.