

М. В. КАСЬЯН, А. Г. САРКИСЯН, Г. С. МИНАСЯН

ДЕФОРМАЦИЯ В ЗОНЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

Важнейшей задачей при изучении процесса резания является установление вида пластической деформации, позволяющей более точно выразить истинные показатели деформации частиц, находящихся в зоне стружкообразования.

Современные взгляды различных авторов [1—4] о природе процесса образования стружки сводятся к тому, что деформация в пластической зоне не обуславливается лишь деформацией сдвига, а включает в себя и элементы деформации сжатия. Правда, большинство из них предполагает, что доля сжатия незначительна по сравнению с деформацией сдвига и поэтому деформированное состояние единичного зерна характеризуют согласно схеме простого сдвига (рис. 1 а). С помощью этой схемы доказывается [1, 5], что величина деформации (относительный сдвиг ε) связана с углом λ следующей зависимостью

$$2\operatorname{ctg} 2\lambda = \varepsilon, \quad (1)$$

$$\text{откуда определяется } \operatorname{ctg} \lambda = \frac{\varepsilon}{2} + \sqrt{1 + \frac{\varepsilon^2}{4}}, \quad (2)$$

а истинная деформация при этом равна

$$e = \ln \frac{r}{r_0} = \ln \operatorname{ctg} \lambda = \ln \left(\frac{\varepsilon}{2} + \sqrt{1 + \frac{\varepsilon^2}{4}} \right). \quad (2a)$$

Истинный сдвиг

$$\varepsilon_{\text{н}} = 2e = \ln \left(\frac{\varepsilon}{2} + \sqrt{1 + \frac{\varepsilon^2}{4}} \right)^2 = \ln \left(1 + \frac{\varepsilon^2}{2} + \varepsilon \sqrt{1 + \frac{\varepsilon^2}{4}} \right), \quad (3)$$

из рисунка 1б следует, что

$$\varepsilon = \frac{AE}{OA} = \operatorname{ctg} \beta + \operatorname{tg} (\beta - \gamma). \quad (4)$$

Следовательно, имея степень деформации ε , можно определить остальные показатели деформированного состояния при простом сдвиге. В отличие от этого часть исследователей считает, что доминирующим при превращении снимаемого слоя в стружку является деформация сжатия [6, 7].

При этом за критерии деформации принимается усадка стружки аналогично усадке образца при пластическом сжатии, подчиняющейся полнотропической закономерности.

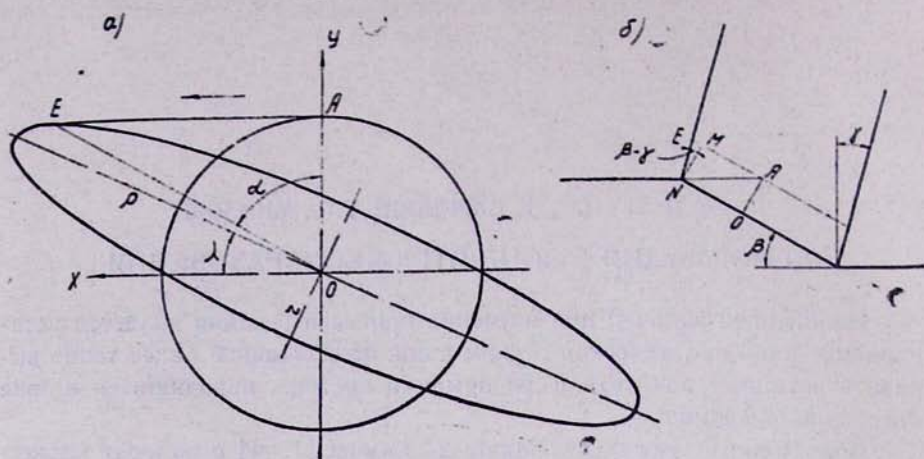


Рис. 1.

В последнее время все больше намечается тенденция рассматривать процесс стружкообразования как сложный вид пластической деформации—сдвиг со сжатием [8, 9]. Однако, если при простом сдвиге, как уже указывалось, существуют четко сформированные зависимости между характеристиками деформированного состояния, решение подобной задачи для случая сдвига со сжатием пока не существует. Ниже рассматривается метод вычисления параметров деформированного состояния единичного зерна при указанном виде деформации.

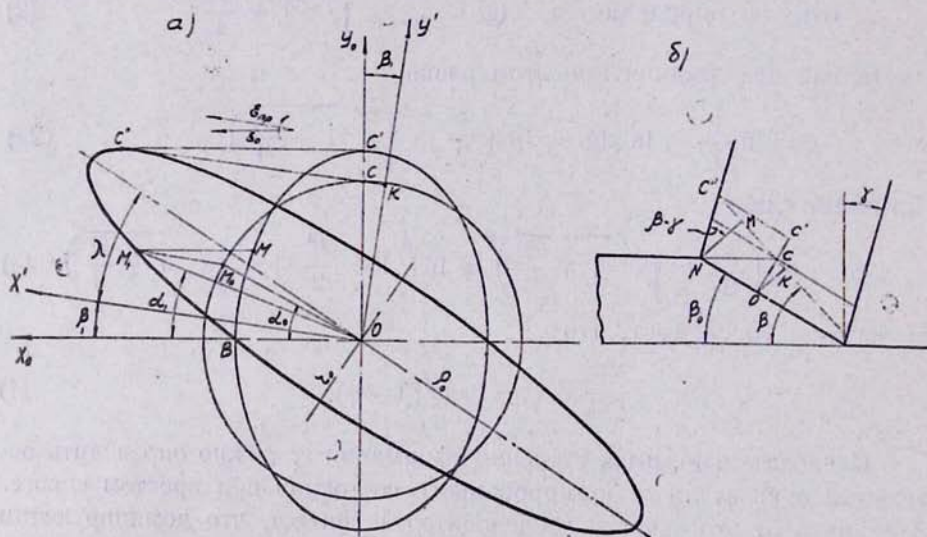


Рис. 2.

Чтобы выяснить, в каких соотношениях находится деформация сдвига и сжатия, в общей картине деформации рассмотрим их отдельно (рис. 2 а).

Допустим, что окружность с радиусом R сначала подвергается деформации сжатия, превращаясь в эллипс с осями $\rho = \rho'$; $r = 0B$. Величина этой деформации в направлении X_0 будет

$$e_x = \frac{R-r}{R} = 1 - \frac{r}{R} = 1 - k_1 \quad k_1 = \frac{r}{R}$$

в направлении y_0 (деформация растяжения) $e_y = k_2 - 1$, где

$$k_2 = \frac{\rho}{R}.$$

Так как рассматривается однородная плоская деформация, то площади исходной окружности и полученного эллипса равны, т. е. $\rho \cdot r = R^2$, что дает возможность написать

$$e_y = \frac{e_x}{1 - e_x} = \frac{e_x}{k_1} = k_2 e_x; \quad k_1 \cdot k_2 = 1.$$

В результате равномерного сжатия произвольная точка $M_0(x_0; y_0)$ на окружности переходит в точку $M(k_1 x_0; k_2 y_0)$ на эллипсе, а точка $C(0; R)$ в точку $C'(0; k_2 R)$.

После завершения деформации сжатия происходит сдвиг по направлению оси X_0 , при этом окружность окончательно превращается в эллипс с осями ρ_0 ; r_0 (рис. 2а). Исходная точка M_0 переходит в точку M_1 .

Полученное деформированное состояние, естественно, должно характеризоваться деформацией сжатия e_x (e_y) и относительным сдвигом

$$\varepsilon_0 = \frac{C'C''}{OC'}.$$

Наряду с этим, из рисунка следует, что эквивалентное деформированное состояние можно было получить в результате деформации окружности путем простого сдвига по направлению оси X' с приведенным относительным сдвигом $\varepsilon_{np} = \frac{CC''}{OK}$. Знание этой величины, как указывалось выше, позволяет определить остальные параметры деформированного состояния.

Как видно из рисунка, ось X' составляет с осью X_0 угол β_1 , следовательно, при наличии деформации сжатия приведенный относительный сдвиг ε_{np} не совпадает с направлением основного сдвига. Сжатие приводит к повороту направления основного сдвига по часовой стрелке на угол β_1 .

Следует отметить, что принятая схема деформации подтверждает точку зрения тех исследователей, которые полагают, что за счет деформации сжатия результирующие перемещения происходят под несколькими большими углами, чем предусматривается схемой простого сдвига [1, 10].

Исходя из этого можно утверждать, что существующие формулы для определения относительного сдвига (4) в зоне резания и соответ-

ствующий ему истинный сдвиг (3) не будут соответствовать действительности по мере увеличения доли сжатия.

Переходим к определению величин показателей деформированного состояния при принятой схеме деформации величин $\alpha_{1(p=p_{\max})}$; $\varepsilon_{\text{пр}}$; β_1 .

Из рисунка следует, что координаты произвольной точки в деформированном состоянии связаны с исходными координатами следующей зависимости

$$x_{M_1} = k_1 x_0 + k_2 \cdot y_0 \cdot \varepsilon_0.$$

$$y_{M_1} = k_2 y_0.$$

Преобразование углов при этом выражается

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \frac{x_{M_1}}{y_{M_1}} = \varepsilon_0 + k_1^2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_0. \quad (5)$$

Направление главной деформации $\alpha_{1(p=p_{\max})}$ определяется так: расстояние произвольной точки эллипса от центра равно

$$\rho^2 = x_{M_1}^2 + y_{M_1}^2 = (k_1 x_0 + k_2 y_0 \cdot \varepsilon_0)^2 + (k_2 y_0)^2, \quad (6)$$

учитывая, что $x_0 = R \cdot \cos \alpha_0$; $y_0 = R \cdot \sin \alpha_0$, дифференцируя (6) и приравнявая производную нулю $\frac{d\rho}{d\alpha} = 0$, получаем условие максимума

$$\rho = \rho_{\max} \\ \operatorname{ctg} 2\alpha_0 = \frac{k_1^2 - k_2^2 - k_2^2 \cdot \varepsilon_0^2}{2 \cdot \varepsilon_0} = \frac{(1 - e_x)^4 - 1 - \varepsilon_0^2}{2(1 - e_x)^2 \cdot \varepsilon_0}; \quad (7)$$

вставляя значение α_0 (7) в (5), получаем направление наибольших деформаций по отношению основного сдвига ε_0 (направление ось x_0)

$$\operatorname{ctg} \alpha_{1(p=p_{\max})} = \varepsilon + k_1^2 \operatorname{ctg} \left[\frac{1}{2} \arccot \operatorname{ctg} \frac{(1 - e_x)^4 - 1 - \varepsilon_0^2}{2(1 - e_x)^2 \cdot \varepsilon_0} \right], \quad (8)$$

при $e_x = 0$ (следовательно, $k_1 = 1$) выражение (8) преобразуется в (2).

Ранее Рамалингэмом [9] была предложена зависимость $\alpha_{1(p=p_{\max})} = \frac{1}{2} \arccot \operatorname{ctg} \frac{[1 - (1 - e_x)^4 - \varepsilon_0^2]}{2 \cdot \varepsilon_0}$ для определения положения главной деформации при присутствии деформации сжатия. Поскольку эта зависимость выведена без доказательств и к тому же не отвечает граничным условиям, тогда как выражение (8) строго обосновано, то предпочтение следует отдать этому выражению.

Наибольший интерес представляет величина и направление результирующего сдвига $\varepsilon_{\text{пр}}$, который, как указывалось выше, полностью характеризует деформированное состояние единичного зерна. Сперва определим угол отклонения между сдвигами $\varepsilon_{\text{пр}}$ и ε_0 — угол β_1 . Из $\Delta \text{ССС}''$ нетрудно доказать, что

$$\beta_1 = \arctg \frac{e_x}{\varepsilon_0} \quad (9) \quad \text{или} \quad \beta_1 = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2e_y}{\varepsilon_{np}}, \quad (9a)$$

откуда следует, что чем значительнее деформация сжатия, тем на больший угол поворачивается направление основного сдвига по часовой стрелке и тем меньше процесс резания соответствует схеме простого сдвига.

Величина приведенного относительного сдвига, обуславливающего окончательную деформацию, определяется так:

$$\varepsilon_{np} = \frac{CC''}{OK}, \quad \text{где} \quad CC'' = \frac{C'C''}{\cos^2 \beta_1} = \frac{k_2 \cdot R \cdot \varepsilon_0}{\cos^2 \beta_1}; \quad OK = R \cdot \cos \beta_1,$$

$$\text{отсюда} \quad \varepsilon_{np} = \frac{k_2 \cdot \varepsilon_0}{\cos^2 \beta_1} = k_2 \cdot \varepsilon_0 (1 + \tg^2 \beta_1), \quad \text{учитывая} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{np} = k_2 \cdot \varepsilon_0 \left(1 + \frac{e_x^2}{\varepsilon_0^2} \right) = \frac{\varepsilon_0}{1 - e_x} + \frac{e_x^2}{\varepsilon_0 (1 - e_x)}. \quad (10)$$

Получаемая зависимость (10) показывает, что при наложении сжатий общая деформация увеличивается, причем тем значительнее, чем больше e_x .

Однако выражения (9; 9a; 10) в таком виде хотя и объясняют взаимосвязь процессов сдвига и сжатия в общей картине деформации, но не дают возможности расчленить действие отдельных процессов. Дело в том, что в окончательной картине деформированного состояния зоны стружкообразования невозможно отличить влияние этих деформаций в чистом виде. Исходя из сказанного, необходимо связать ε_{np} с известными параметрами зоны стружкообразования. С этой целью данная схема деформации показана в зоне стружкообразования, откуда видно, что благодаря наличию деформации сжатия направление сдвигов увеличивается от β_0 до β . Величина относительного сдвига, как известно, будет

$$\varepsilon_{np} = \frac{CC''}{OK} = \frac{C''M + MC}{OK} = \frac{MN [\ctg \beta + \tg (\beta - \gamma)]}{OK} = \varepsilon \cdot \frac{MN}{OK}.$$

Следовательно, зависимость (4) полностью не характеризует степень деформации зоны стружкообразования при наличии деформации сжатия.

Вставляя $MN = CN \cdot \sin \beta$; $OK = CN \sin \beta_0 \cdot \cos (\beta - \beta_0)$, получим

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon \frac{\sin \beta}{\sin \beta_0 \cdot \cos (\beta - \beta_0)} \quad (11), \quad \text{где} \quad \beta - \beta_0 = \beta_1,$$

Зависимость (11) необходимо упростить с таким расчетом, чтобы избавиться от угла β_0 , который нельзя измерять экспериментально. Для этого $\sin \beta_0$ представим как $\sin [\beta - (\beta - \beta_0)]$ и, проделав некоторые преобразования, получим:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{пр}} &= \frac{2 \cdot \varepsilon}{\sin 2(\beta - \beta_0) [\operatorname{ctg}(\beta - \beta_0) - \operatorname{ctg} \beta]} = \\ &= \frac{2 \cdot \varepsilon}{\sin 2(\beta - \beta_0) \left[\frac{\sin 2(\beta - \beta_0)}{1 - \cos 2(\beta - \beta_0)} - \operatorname{ctg} \beta \right]}. \quad (11a)\end{aligned}$$

Наиболее интересно найти связь между окончательной деформацией $\varepsilon_{\text{пр}}$ и ε (обычно принятый относительный сдвиг).

Учитывая (9a) и проделав некоторые преобразования, выражение (11a) можно представить в виде:

$$\varepsilon = e_y \left[\frac{\frac{2e_y}{\varepsilon_{\text{пр}}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{4e_y^2}{\varepsilon_{\text{пр}}^2}}} - \operatorname{ctg} \beta \right],$$

а окончательно:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon + e_y \operatorname{ctg} \beta + \frac{e_y^2}{\varepsilon + e_y \operatorname{ctg} \beta} \quad (12)$$

или

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon + \frac{e_x}{1 - e_x} \operatorname{ctg} \beta + \frac{e_x^2}{[(1 - e_x) \varepsilon + e_x \operatorname{ctg} \beta] (1 - e_x)}. \quad (12a)$$

Таким образом, выясняется, что при наличии деформации сжатия величину общей деформации нельзя характеризовать лишь углом β . При помощи этих выражений имеется возможность определить те поправки, которые вносит деформация сжатия в общую деформацию стружкообразования. По аналогии с деформацией простого сдвига $\varepsilon_{\text{пр}}$ можно определить выражением (1) с помощью угла текстуры (рис. 2a). Следовательно, при помощи уравнения (12) и по микрофотографиям корня стружки можно получить исчерпывающие данные о деформированном состоянии зоны стружкообразования. Определение параметров деформированного состояния предварительно растянутой частицы (по оси X), подвергнувшейся дальнейшему сдвигу, аналогично вышеизложенному, с той лишь разницей, что величина $e_x(e_y)$ меняет свой знак в выражениях (10, 12). Естественно, при этом снижается и степень общей деформации в зоне стружкообразования. В действительности, ориентация предварительно деформированной частицы по направлению основного сдвига произвольна. Однако в любом случае закономерности деформации подчиняются одной из схем—либо сдвиг приводит к увеличению общей степени деформации, либо к его уменьшению. Под общей степенью деформации следует понимать деформацию частицы, подвергнувшейся простому сдвигу.

Исходя из приведенных соображений интересно выявить роль деформации сжатия в общей картине деформированного состояния в зоне резания экспериментально-аналитическим путем.

Ниже, в табл. 1, 2, приведены значения соответствующих деформаций сдвига и сжатия в зависимости от скорости резания для материалов: железо Армко и сталь У8А. Величины ε , ε_y (ε_x); β_1 определены с помощью выражений (4, 12, 9а), углы λ и β с помощью микрофотографий зон резания.

Железо Армко $s=0,39$ мм/об

Таблица 1

$V \frac{м}{мин}$	β°	ε	λ°	$\varepsilon_{пр}$	ε_y	ε_x	β_1°
20	11	5,25	10	5,494	0,047	-0,045	0°30'
30	14	4,17	12	4,49	0,0797	-0,074	1°0'
50	14	4,17	14	3,76	0,102	-0,092	1°30'
80	16	3,68	15	3,464	-0,06	0,066	1°0'
125	21	2,89	16	3,2	0,12	-0,13	2°09'
155	25	2,51	18	2,75	0,11	-0,10	2°18'

Сталь У8А $s=0,39$ мм/об

Таблица 2

$V \frac{м}{мин}$	β°	ε	λ°	$\varepsilon_{пр}$	ε_y	ε_x	β_1°
20	24	2,59	20	2,38	-0,0945	0,104	2°18'
30	25	2,51	22	2,07	-0,215	0,273	3°12'
50	28	2,305	24	1,8	-0,295	0,42	9°36'
80	30	2,2	24	1,8	-0,253	0,34	8°09'

Данные таблиц показывают, что при обработке железа Армко средняя деформация частиц в зоне резания обуславливается в основном деформацией простого сдвига, а роль деформации сжатия незначительна. Правда, с увеличением скорости резания проявляется тенденция некоторого возрастания этой деформации. При обработке стали У8А роль деформации сжатия становится существенной, особенно при высоких скоростях резания. Так, в интервале от $v = 20 \div 80$ м/мин деформация растяжения в горизонтальном направлении достигает величины $\varepsilon_x = 10,5 \div 34\%$, что соответствует деформации сжатия в вертикальном направлении $\varepsilon_y = 9,5 \div 25\%$.

Следовательно, если угол сдвига с достаточной точностью характеризует деформированное состояние зоны резания при обработке железа Армко, то для стали У8А знание этого угла недостаточно. Для таких прочных материалов требуется учитывать сложность деформированного состояния.

Отметим, что положение, согласно которому роль деформации сжатия становится заметной при обработке прочных материалов, ранее было высказано Н. Н. Зоревым [1].

Если принять, что вид происходящей деформации в зоне стружкообразования соответствует предложенной схеме деформации, то можно заключить, что:

1. Параметры деформированного состояния зоны стружкообразования ϵ , e , ϵ_0 при наличии деформации сжатия (растяжения) в действительности имеют более высокие (низкие) значения, чем можно было ожидать из схемы простого сдвига.

2. Направление основных сдвигов обуславливается не условным углом сдвига β , а углом $\beta \pm \arctg \frac{\epsilon_x}{\epsilon_0}$. Исходя из этого положения становится понятным, почему напряжения, вычисляемые с помощью угла β , не совсем точно соответствуют действительности.

3. Наиболее правильное представление о деформированном состоянии зоны резания следует составить при помощи угла текстуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Зорев. Вопросы механики процесса резания металлов. Машгиз, 1956.
2. М. И. Клушин. Резание металлов. Машгиз, 1958.
3. Т. Н. Лоладзе. Стружкообразование при резании металлов. Машгиз, 1952.
4. А. М. Розенберг, Г. Л. Куфарев. Определение степени пластической деформации металла при резании. «Вестник машиностроения», 1958, № 6.
5. А. Надаи. Пластичность и разрушение твердых тел, т. 1, ИЛ, 1954.
6. В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела, т. III, Томск, 1944.
7. В. А. Кривоухов. Деформирование поверхностных слоев металлов в процессе резания. Машгиз, 1945.
8. Р. Б. Мартirosян. Резание металлов как процесс пластической деформации сжатия и сдвига. Ереван, 1963.
9. Рамалингэм. Деформация при прямоугольном резании. Труды американского общества инженеров-механиков. «Констр. и тех. машин», серия В, 1970, № 1.
10. M. C. Shaw, H. N. Cook and J. Finnie, The shear—Angle Relationship in Metal cutting Trans. ASME 75, 1953.