

**РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СДВИГА ПРИ
РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ**

Г. Л. КУФАРЕВ

(Представлено профессором доктором А. М. Розенбергом)

Процесс резания металлов является процессом пластической деформации. Вопрос о виде деформированного состояния при резании до настоящего времени является нерешенным. Одни авторы уподобляют процесс резания процессу сжатия, другие — простому сдвигу.

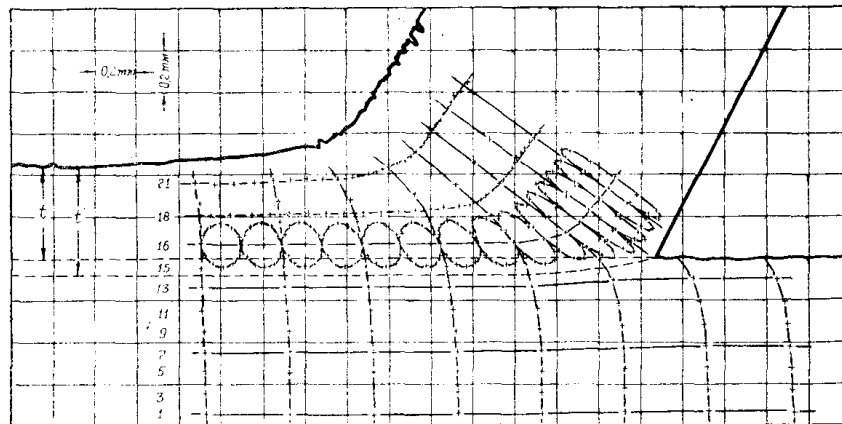
Можно экспериментально доказать, что видом напряженно-деформированного состояния в процессе резания является простой сдвиг, смежный со сжатием. По В. М. Розенбергу [1] вид деформированного состояния характеризуется углом β :

$$\frac{e_1 + e_2 - 2e_3}{e_1 - e_2} = \frac{\text{tg}(30^\circ - \beta)}{\text{tg} 30^\circ} \quad (1)$$

Здесь e_1, e_2, e_3 — главные деформации; $e_1 > e_3 > e_2$;

β — угол, характеризующий вид напряженно-деформированного состояния.

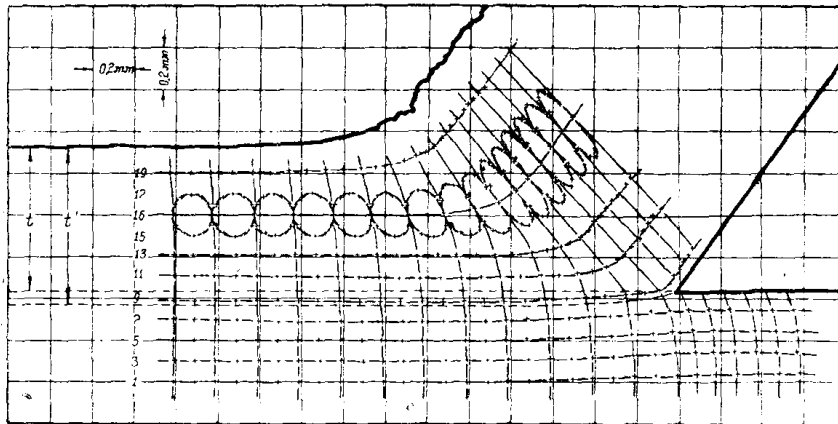
Согласно выводам В. М. Розенберга при растяжении $\beta = 0$, при простом сдвиге $\beta = 30^\circ$, при простом сжатии $\beta = 60^\circ$. На фиг. 1 и 2 при-



Фиг. 1

ведены картины деформации сетки окружностей, полученные при свободном резании медного образца резцами, имеющими передние углы $\gamma = 27^\circ$ и 37° . Крестиками на этих фигурах обозначены центры кони-

ческих отпечатков диаметром 0,03 мм, предварительно нанесенных в определенной системе на тщательно отполированную поверхность образца.



Фиг. 2

Измерение полуосей эллипсов, в которые превратились окружности после деформации, позволяет найти величины главных деформаций по формулам:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= \ln \frac{a}{r}; \\ e_2 &= \ln \frac{b}{r}; \\ e_3 &= -e_1 - e_2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где a и b — полуоси эллипса,

r — радиус окружности до деформации.

Полученные величины главных деформаций приведены в табл. 1.

Таблица 1

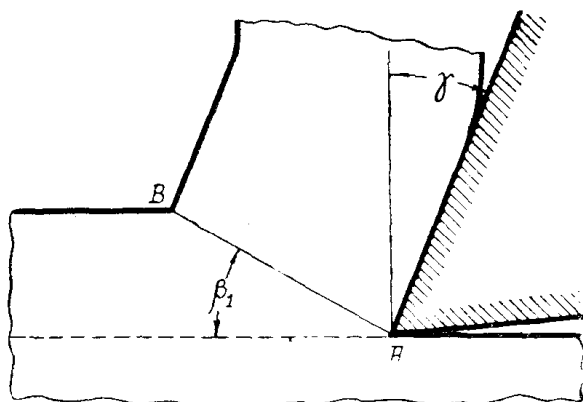
Фигура	γ	e_1	e_2	e_3
не приведена	17°	1,1787	-1,2910	0,1123
1	27°	1,0280	-1,0499	0,0219
2	37°	0,7419	-0,8440	0,1021

Расчет угла β по формуле (1) для случаев резания с передними углами $\gamma = 17^\circ$, 27° и 37° дает соответственно значения $34^\circ 30'$, $31^\circ 03'$ и $36^\circ 22'$, что и говорит о наличии в процессе резания деформации простого сдвига смежного со сжатием. При этом очевидно, что доля сжатия в данном виде деформированного состояния несущественна, поскольку отклонение угла β от значения $\beta = 30^\circ$ невелико.

Тот факт, что в процессе резания имеет место и деформация сжатия (деформация в направлении третьей главной оси), объективно подтверждается экспериментально наблюдаемым уширением стружки. Вместе с тем уширение стружки обычно невелико (5—10%). Если бы уширение стружки в процессе ее снятия отсутствовало, то такой процесс являлся бы процессом только простого сдвига.

Как показали работы А. М. Розенберга [2] и В. В. Кузюшина [3], степень деформации при резании пластичных металлов должна характеризоваться величиной относительного сдвига.

До последнего времени предложены две зависимости для определения относительного сдвига при резании. Первая из них основывается на предположении, что вся деформация в процессе резания происходит путем сдвига в направлении плоскости АВ (фиг. 3), составляющей с направлением движения резца некоторый угол β_1 , величина которого может быть подсчитана по усадке стружки:



Фиг. 3

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

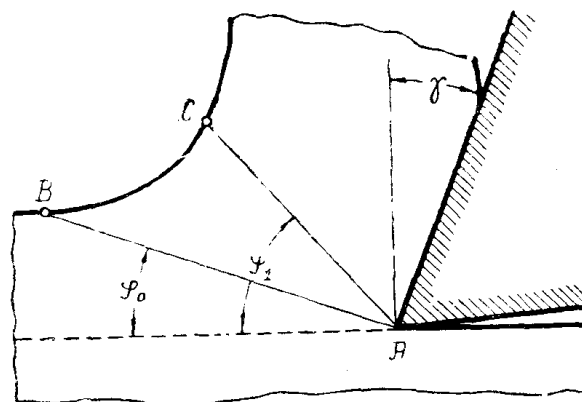
где γ — передний угол резца, ζ — усадка стружки, определяемая отношением толщины стружки к толщине снимаемого слоя.

При этом предположении получается следующая формула для определения относительного сдвига:

$$\epsilon = \operatorname{ctg} \beta_1 + \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma). \quad (3)$$

Данная зависимость впервые была получена Мерчантом [4], а позже рядом советских исследователей [5, 2, 3].

Зорев [6] выводит уравнение для относительного сдвига на базе иных представлений о процессе резания. Он предполагает, что деформация металла при резании в зоне ABC (фиг. 4) протекает путем последовательных сдвигов вдоль плоскостей, веером выходящих от режущего лезвия. Плоскость AC, положение которой определяется углом φ_1 , является границей, на которой деформация металла заканчивается. Величину конечного относительного сдвига на плоскости AC (а значит и в стружке) Зорев определяет по формуле



Фиг. 4

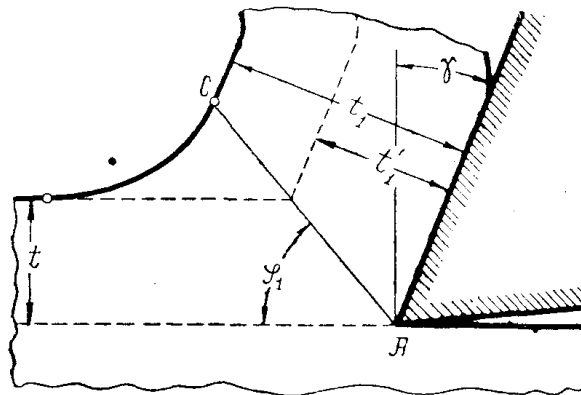
$$\epsilon_{\varphi_1} = \operatorname{ctg} \varphi_1 + \operatorname{tg} (\varphi_1 - \gamma). \quad (4)$$

Следует отметить, что данная зависимость находится в противоречии с основными предпосылками автора. Именно таким был бы относительный сдвиг в том случае, когда бы вся деформация протекала в плоскости, определяемой углом φ_1 . Но это значит, что формула (4) позволяет определить величину относительного сдвига, протекающего только в плоскости AC, но не учитывает деформацию, происшедшую в зоне ABC.

Таким образом, оценивать степень деформации металла в стружке относительным сдвигом, рассчитанным по формуле (4), принципи-

ально неверно. Эту же мысль можно пояснить иначе. Если при снятии толщины слоя t вся деформация происходит в плоскости АС (фиг. 5), то толщина стружки, получившаяся в результате такой деформации, окажется равной величине t_1' , что меньше фактически имеющей место толщины стружки t_1 . Из сказанного следует, что формула (4) должна давать заниженные значения относительного сдвига.

Формула (3) безоговорочно может быть принята лишь тогда, когда действительная картина деформации близка к схеме, изображенной на фиг. 3, то есть в том случае, когда зона предварительной деформации АВС (фиг. 4) невелика и может быть сведена к плоскости. Однако часто (особенно при резании со скоростями меньше 1 м/мин) зона предварительной деформации оказывается существенной. В этих случаях справедливость формулы (3) может быть поставлена под сомнение.



Фиг. 5

Подобно этому и для любого другого выражения относительного сдвига, выведенного на основе той или иной приближенной схемы деформации при резании, будут присущи все недостатки и ограничения, распространяющиеся на данную приближенную схему. Действительная же картина деформированного состояния в процессе резания металлов, ввиду ее сложности, в настоящее время точному математическому анализу не поддается.

Поэтому представляется целесообразным получить такую зависимость для относительного сдвига, которая позволяла бы определять его независимо от схемы деформации при резании.

Подобную зависимость можно вывести опираясь на следующие экспериментальные факты.

1. Вид деформированного состояния при резании чрезвычайно близок к простому сдвигу. Круг, нанесенный на боковую поверхность образца, после деформации превращается в эллипс. Площадь эллипса лишь несущественно отличается от площади исходного круга.

2. Линии, которые до деформации были параллельны движению резца, после деформации оказываются параллельными передней грани инструмента. Это положение справедливо как при отсутствии, так и при наличии зоны предварительной деформации (фиг. 3) ¹⁾.

3. Направление текстуры стружки является направлением наибольшей деформации растяжения, то есть совпадает с большой полуосью эллипса [11].

Пусть при снятии слоя толщиной t (фиг. 6) образовалась стружка, толщина которой t_1 . Таким образом усадка стружки оказалась равной

$$\zeta = \frac{t_1}{t} \dots$$

При этом окружность с центром в точке О превратилась в равновеликий по площади эллипс, большая ось которого составила с направле-

¹⁾ См. фиг. 7 в статье „Скорость деформации в процессе резания пластичного металла“, помещенной в этом сборнике.

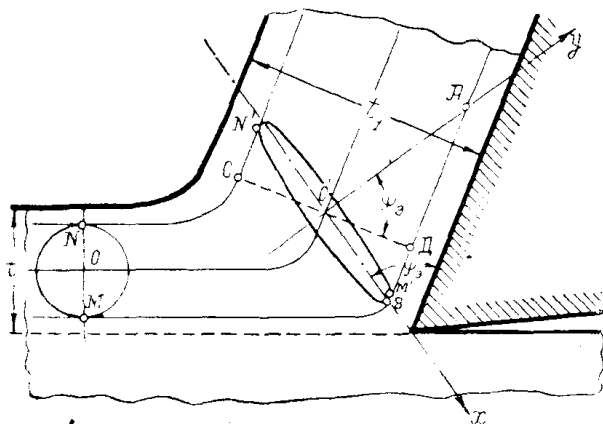
нием передней грани резца угол ψ_ε . Точки M и N окружности оказываются лежащими на прямых, параллельных передней грани, расположенных друг от друга на расстоянии CD , равном:

$$CD = MN \cdot \zeta.$$

Если принять радиус окружности за единицу, то

$$O'D = r \cdot \zeta = \zeta.$$

Выберем систему координат с центром в точке O' , оси которой x и y совпадают с главными осями эллипса. Прямая AB является касательной к эллипсу в точке M' и поэтому в принятой системе координат выражается уравнением



Фиг. 6

$$\frac{x \cdot x_{M'}}{a^2} + \frac{y \cdot y_{M'}}{b^2} = 1, \quad (5)$$

где x и y — текущие координаты касательной,
 $x_{M'}$ и $y_{M'}$ — координаты точки касания,
 a и b — большая и малая полуоси эллипса.

Координаты точки A :

$$x_a = 0;$$

$$y_a = O'A = \frac{O'D}{\cos \psi_\varepsilon} = \frac{\zeta}{\cos \psi_\varepsilon}.$$

Координаты точки B :

$$x_b = O'B = \frac{O'D}{\sin \psi_\varepsilon} = \frac{\zeta}{\sin \psi_\varepsilon};$$

$$y_b = 0.$$

Подставляя последовательно координаты точек A и B в уравнение касательной (5), которой они принадлежат, найдем координаты точки касания M' :

$$x_{M'} = \frac{a^2 \cdot \sin \psi_\varepsilon}{\zeta};$$

$$y_{M'} = \frac{b^2 \cdot \cos \psi_\varepsilon}{\zeta}.$$

Но точка M' принадлежит эллипсу, значит

$$\frac{x_{M'}^2}{a^2} + \frac{y_{M'}^2}{b^2} = 1. \quad (6)$$

Подставляя в это уравнение найденные значения координат точки M' и заметив, что при равенстве площадей круга и эллипса $a \cdot b = r^2 = 1$,

то есть $b = \frac{1}{a}$, получим

$$a^4 - \frac{\zeta^2}{\sin^2 \psi_3} \cdot a^2 + \text{ctg}^2 \psi_3 = 0.$$

Решение этого уравнения позволяет определить величину a

$$a = \sqrt{-\frac{\zeta^2}{2 \cdot \sin^2 \psi_3} + \sqrt{\frac{\zeta^4}{4 \cdot \sin^4 \psi_3} - \text{ctg}^2 \psi_3}}. \quad (7)$$

Зная величину большой полуоси эллипса, можно рассчитать величину главной деформации в направлении этой оси

$$e_1 = \ln \frac{a}{r} = \ln a = \ln \sqrt{\frac{\zeta^2}{2 \cdot \sin^2 \psi_3} + \sqrt{\frac{\zeta^4}{4 \cdot \sin^4 \psi_3} - \text{ctg}^2 \psi_3}}. \quad (8)$$

Принимая во внимание имеющиеся в литературе [7] указания по расчету величины максимального относительного сдвига при деформации простого сдвига, получим:

$$\gamma_{\kappa'} = 2 \cdot \text{sh } e_1 = 2 \cdot \text{sh} \left[\ln \sqrt{\frac{\zeta^2}{2 \cdot \sin^2 \psi_3} + \sqrt{\frac{\zeta^4}{4 \cdot \sin^4 \psi_3} - \text{ctg}^2 \psi_3}} \right]. \quad (9)$$

Здесь $\gamma_{\kappa'}$ — максимальный относительный сдвиг при резании,
 ζ — усадка стружки,
 ψ_3 — экспериментально определяемый угол между направлением текстуры материала стружки и передней гранью реза.

Таким образом, данный метод позволяет определить величину относительного сдвига при резании металлов по двум экспериментально найденным величинам — ζ и ψ_3 ; вывод уравнения относительного сдвига базируется только на вполне надежных экспериментальных фактах и свободен от недостатков какой-либо из приближенных схем деформации при резании.

В силу этого данный метод определения величины относительного сдвига в процессе резания является наиболее объективным из всех существующих.

В случае, когда угол ψ_3 оказывается больше 75° , равенство (7) может быть с достаточно большой степенью точности приведено к виду:

$$a = \frac{\zeta}{\sin \psi_3}.$$

И тогда

$$\gamma_{\kappa'} = 2 \text{sh} \left[\ln \frac{\zeta}{\sin \psi_3} \right].$$

Угол ψ_3 может быть определен по микрошлифу стружки.

Методика определения усадки стружки при резании с большими скоростями в настоящее время разработана достаточно полно и в пояснении не нуждается.

Что же касается определения усадки при резании на микроскоростях (до 1 м/мин), то здесь необходимо указать на одно обстоятельство, которое до сих пор никем во внимание не принималось.

Как следует из фиг. 1 и 2, картина деформации при резании с малыми скоростями (эти корки получены при $V = 19 \text{ м/мин}$) такова, что в стружку переходит не только материал, расположенный выше теоретической линии среза, но и часть материала, расположенного ниже этой линии.

Об этом же свидетельствует характер искажения квадратной сетки в исследованиях других авторов [8, 9].

Следовательно, усадка, определенная по отношению

$$\zeta = \frac{t_1}{t},$$

в данном случае не имеет физического смысла. Правильное значение усадки стружки определяется следующим образом:

$$\zeta = \frac{t_1}{t'},$$

где t' — толщина слоя металла, фактически ушедшего в стружку; $t' > t$ (фиг. 1 и 2). Допустимо здесь и определение усадки по зависимости:

$$\zeta = \frac{l}{l_1} \cdot \frac{b}{b_1},$$

где l_1 и b_1 — длина и ширина стружки,
 l — путь резца, на котором снята стружка длиной l_1 ,
 b — ширина среза.

При этом величина l может определяться только путем непосредственного измерения. Определение пути резца методом взвешивания стружки недопустимо. При этом методе путь резца определяется по формуле:

$$l = \frac{Q}{t \cdot b \cdot d},$$

где Q — вес стружки, снятой на пути l ,
 t и b — толщина и ширина снимаемого слоя,
 d — плотность металла.

Поскольку в этой зависимости значение t окажется меньше действительного, то l , а затем и ζ будут получаться заведомо завышенными.

Итак, в приложении к стружкам, изображенным на фиг. 1 и 2, можно рассчитать величину максимального относительного сдвига тремя методами:

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

где

$$\text{tg } \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\zeta - \sin \gamma}.$$

$$2. \varepsilon \varphi_1 = \text{ctg } \varphi_1 + \text{tg } (\varphi_1 - \gamma),$$

где φ_1 — угол между верхней границей зоны пластической деформации и направлением движения резца (определяется непосредственно по фотографии корня стружки).

$$3. \gamma'_{\kappa} = 2 sh \left[\ln \sqrt{\frac{\zeta^2}{2 \cdot \sin^2 \psi_3} + \sqrt{\frac{\zeta^4}{4 \cdot \sin^4 \psi_3} - \operatorname{ctg}^2 \psi_3}} \right]$$

или

$$\gamma'_{\kappa} \approx 2 sh \left[\ln \frac{\zeta}{\sin \psi_3} \right],$$

где ψ_3 — угол между направлением текстуры материала стружки и плоскостью передней грани резца (определяется экспериментально по микрошлифу стружки или ее корня).

Усадка стружки, фигурирующая в первом и третьем методах, определяется отношением:

$$\zeta = \frac{t_1}{t'}.$$

Для данных трех стружек усадка может быть подсчитана также по отношению размера эллипса после деформации, измеренного в направлении, перпендикулярном к передней грани резца, к диаметру окружности до деформации. Оба эти расчета усадки привели к совершенно одинаковым результатам.

Справедливость каждого из методов расчета относительного сдвига оценивалась сравнением их результатов с действительным максимальным относительным сдвигом, определенным экспериментально по искажению круга в процессе деформации. Здесь главные деформации определялись по формулам (2). По вопросу же расчета относительного сдвига существуют две точки зрения. Многие авторы считают, что максимальным относительным сдвигом является разность двух главных деформаций, определенных по искажению круга, то есть:

$$g' = e_1 - e_2. \quad (10)$$

Наряду с этим В. Г. Осипов [7] и А. Надаи [10] считают, что в приложении к процессу простого сдвига сдвиг, определяемый по формуле (10), является псевдомаксимальным, а соответствующий ему максимальный относительный сдвиг следует определять по зависимости

$$\gamma_{\kappa} = 2 sh \frac{g'}{2}. \quad (11)$$

Мы в своих расчетах ориентировались на выражение (11). Результаты расчета относительного сдвига по различным методам сведены в табл. 2.

Таблица 2

Фигура	Передний угол резца	γ_{κ}	ϵ	$\epsilon - \gamma_{\kappa}$ в %	ϵ_{φ_1}	$\epsilon_{\varphi_1} - \gamma_{\kappa}$ в %	γ_{κ}'	$\gamma_{\kappa}' - \gamma_{\kappa}$ в %
—	17°	3,1476	3,266	+ 3,80	2,8230	— 10,30	3,1852	+ 1,20
1	27°	2,4726	2,549	+ 3,10	2,0483	— 17,20	2,4758	+ 0,13
2	37°	1,7575	1,796	+ 2,20	1,4352	— 18,30	1,7363	— 1,10

Анализ данных таблицы позволяет сделать следующие выводы.

1. Первый метод дает чрезвычайно близкие к действительности, но систематически завышенные значения относительного сдвига.

2. Результаты расчета по второму методу дают существенно заниженные значения относительного сдвига, а поэтому данный метод следует считать неприемлемым.

3. Третий метод дает точное совпадение с экспериментально определенными значениями относительного сдвига, и может считаться наиболее правильным из трех рассмотренных методов.

При работе с большими скоростями резания зона предварительной деформации, как показывает опыт, совершенно незначительна. В этом случае расчеты по первому и третьему методам приводят к одинаковым результатам. В силу того, что третий метод может квалифицироваться экспериментальным, это совпадение результатов должно рассматриваться как доказательство применимости первого метода для расчета относительного сдвига в процессе резания с большими скоростями. Что касается второго метода, то применение его в приложении к работе на больших скоростях оказывается невозможным. Верхняя граница зоны деформации при этом¹⁾ располагается совершенно иначе, нежели предполагает схема второго метода (фиг. 4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов-Аляев Г. А. Сопротивление материалов пластическим деформациям. Машгиз, 1949.
2. Розенберг А. М. и Еремин А. Н. Пластическая деформация стружки при резании металлов. Известия ТПИ, том 75, 1954.
3. Кузюшин В. В. Пластическая деформация при резании. „Станки и инструмент“ № 4, 1951.
4. E. Merchant — Mechanics of the metal cutting process. „Journal of applied physics“, vol. 16, № 0. 5, 6, 1945.
5. Некрасов С. С. О максимальном значении удельного давления резания. „Подшипник“, № 2 и 4, 1953.
6. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов. Машгиз, 1956.
7. Осипов В. Г. О характеристиках конечных деформаций, Сб. Проблемы металлургии, АН СССР, 1953.
8. W. Okoshi and S. Fukui — Researches on the cutting action of planing tool, by microkinematographic, photoelectric and piezoelectric methods. „Scientific papers of the institute of physical and chemical research“, № 455 — 456, October 25, 1933, v. 22, pp 97 — 166.
9. D. A. Oliver, T. S. Lister, M. D. Kinman, D. Fitzgeorge — Machining research Aircraft production“, vol. 18, № 3, March 1956, pp 118 — 124.
10. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Изд. ИЛ, 1954.
11. Розенберг А. М. и Еремин А. Н. Строение стружки при резании пластичного металла. Известия ТПИ, том 75, 1954.

¹⁾ Смотри фиг. 7 в статье „Скорость деформации в процессе резания пластичного металла“, помещенной в этом сборнике.