

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ И РЕЗАНИЕМ

Л. М. СЕДОКОВ

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

В процессах обработки металлов давлением и резанием осуществляются значительные степени пластической деформации. Поэтому пренебрегать упрочнением даже слабо упрочняющихся металлов нельзя.

Упрочнение реальных материалов определяется кривой течения при растяжении или сжатии, которая может быть записана аналитически в общем виде

$$\tau_{\max} = F(g), \quad (1)$$

в виде показательной

$$\tau_{\max} = Ag^m, \quad (2)$$

или линейной функции

$$\tau_{\max} = \tau_0(1 + 2\alpha g). \quad (3)$$

Здесь $\tau_{\max}$ — максимальное касательное напряжение, равное половине истинного главного нормального напряжения;

g — текущее значение максимального логарифмического сдвига;

A — константа металла, численно равная максимальным касательным напряжениям при $g=1$;

m — показатель упрочнения металла;

τ_0 — условный предел текучести металла, который имел бы место в действительности, если бы зависимость (3) была справедлива с самого начала пластической деформации;

2α — характеристика упрочнения металла, численно равная отношению приращения касательного напряжения за период пластической деформации от $g=0$ до $g=1,0$ к условному пределу текучести.

Аппроксимация кривой течения линейной функцией (3) весьма удобна, но применима только к определенному интервалу деформаций: характеристики металла τ_0 и 2α для очень больших и очень малых деформаций будут несколько отличаться. Поэтому иногда кривую течения заменяют ломаной прямой [1].

В табл. 1 приведены характеристики сопротивления растяжению ряда машиностроительных металлов для расчета по уравнениям (2) и (3). За основу расчета характеристик τ_0 и 2α приняты данные Н. Н. Зорева [2].

На рис. 1 дано сопоставление фактических значений максимальных касательных напряжений в момент образования шейки (при относительном равномерном сужении ψ_p) для ряда металлов по данным Ю. Е. Бондарева [3] с общей линейной зависимостью (3). Соответствующие характеристики металлов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики сопротивления металлов
пластическому сжатию и растяжению
по данным Н. Н. Зорева

Металл	$A \text{ кг/мм}^2$	m	$\tau_0 \text{ кг/мм}^2$	α
Ст. 10	30	0,25	25	0,10
Ст. 30	40	0,154	34	0,08
20X	35	0,159	30	0,08
1X18H9T	54	0,40	36	0,24
Медь	18	0,35	15	0,12

Таблица 2

Характеристики сопротивления металлов растяжению по данным Ю. Е. Бондарева

Металл и его состояние	$S_b \text{ кгс/мм}^2$	ψ_p	$\tau_0 \text{ кгс/мм}^2$	2α
Ст. 40X, закалка, отпуск	130	0,07	60	1,10
Ст. 45. нормализованная	77	0,12	37	0,61
Ст. 3, нормализованная	54	0,21	20,5	1,01
Латунь ЛС59, холоднокатанная	59	0,30	18,5	1,48
Латунь ЛС59 отжиг 400°C	63	0,32	17,5	2,00
Алюминий, отжиг 500°C	13	0,34	3,5	1,90
Медь, отжиг 700°C	34	0,36	9,5	1,47

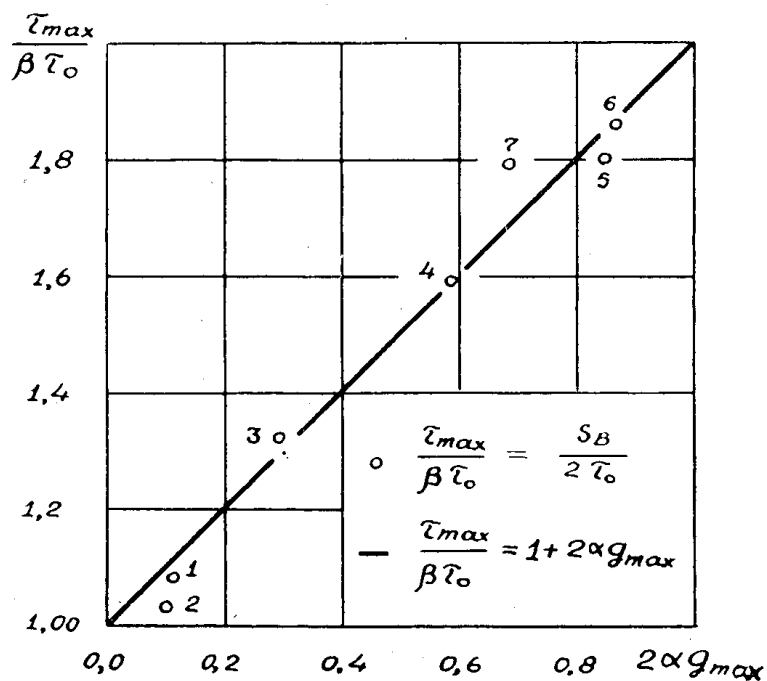


Рис. 1. Сопоставление фактических напряжений
в момент образования шейки с расчетными по
уравнению (3).

Кривая течения и ее аппроксимирующие функции применимы только для того напряженного состояния, при котором они получены. Поэтому использование кривой течения при растяжении или сжатии для других напряженно-деформированных состояний связано с принятием определенного закона пластического течения, т. е. введением корректирующего коэффициента β в формулу (1)

$$\tau_{\max} = \beta F(g). \quad (4)$$

Коэффициент β зависит от вида напряженно-деформированного состояния металла и принятого закона течения.

Широко используются два закона течения:

а) при равных максимальных сдвигах максимальные касательные напряжения равны;

б) при равных октаэдрических сдвигах октаэдрические касательные напряжения равны. По первому закону коэффициент β в формуле (4) всегда равен единице. По второму закону коэффициент β принимают равным единице для напряженно-деформированных состояний, близких к осесимметричной деформации растяжения или сжатия, и равным $2/\sqrt{3} = 1,15$ для напряженно-деформированных состояний, близких к плоской деформации. Второй закон течения часто выражается через интенсивность напряжений (σ_i) и интенсивность деформаций (ε_i), которые пропорциональны соответствующим октаэдрическим величинам

$$\sigma_i = F(\varepsilon_i). \quad (5)$$

Экспериментальные исследования показывают, что некоторые материалы следуют первому закону, а другие, в том числе обычные машиностроительные стали, — второму. Систематические отклонения от второго закона течения отмечаются Ю. И. Ягном и Н. И. Митрохиным [4], А. А. Лебедевым и Г. С. Писаренко [5], В. И. Синельниковым [6], С. И. Ратнер [7] и другими исследователями. Г. А. Смирнов-Аляев [8] указывает на то, что зависимость (5), полученную по опытам на растяжение, нельзя распространить на кручение, так как при кручении нарушаются требования простого нагружения и монотонности протекания деформации, что не может не вызвать дополнительных трудностей при расчете сопротивления пластической деформации.

Руководствуясь изложенным, а также исследованиями П. О. Пашкова [9], А. М. Розенберга и А. Н. Еремина [10], можно сформулировать еще один закон пластического течения металлов: удельная работа пластической деформации, отнесенная к единице максимального сдвига, не зависит от вида напряженно-деформированного состояния

$$\frac{a(g)}{g} = f(g), \quad (6)$$

Применительно к частному случаю плоского напряженного состояния все три закона пластического течения можно записать так:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_s}\right)^2 + \left(\frac{c\tau}{\sigma_s}\right)^2 = 1, \quad (7)$$

где σ и τ — нормальные и касательные напряжения на определенной площадке;

σ_s — предел текучести в процессе пластического растяжения или сжатия;

c — коэффициент при касательном напряжении, который по первому закону пластического течения равен 2, по второму — $\sqrt{3}$ и по третьему — 1,5.

На рис. 2 дано сопоставление (7) с результатами опытов Тейлора и Квини, которые взяты из работы А. Надаи [11]. Если провести среднюю линию по всем опытам, то она расположится между линиями $c = \sqrt{3}$ и $c = 1,50$. Следовательно, третий закон течения примерно так же достоверен, как и второй. Некоторое систематическое занижение ре-

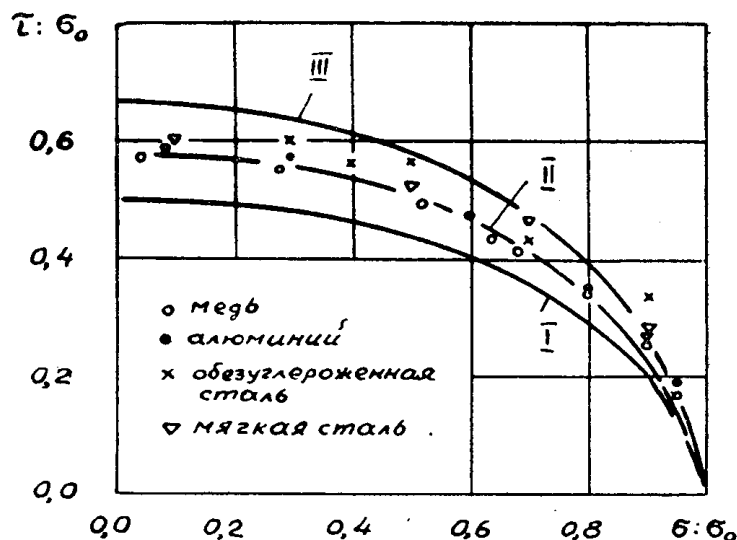


Рис. 2. Сопоставление результатов опытов Тейлора и Квини с условиями пластичности для плоского напряженного состояния.

зультатов опытов по сравнению с третьим законом имеет свое принципиальное объяснение. Переход от линейного напряженного состояния к плоскому по Людвигу [11] сопровождается значительным уменьшением главного удлинения в момент разрушения.

Можно также показать, что процесс сдвига является более энергоемким, чем растяжение. Поэтому развивающаяся пластическая деформация, изменяя деформированное состояние, будет стремиться перейти ближе к равноосной деформации растяжения или сжатия.

Г. А. Дошинский [12] показал, что для различных материалов при одинаковых напряженных состояниях деформированные состояния будут отличаться не только по величине компонентов, но и по характеру. Такое отличие будет иметь место и для одного материала, но на различных стадиях деформирования за счет изменения величины коэффициента поперечной деформации. В связи с этим Г. П. Зайцев предложил новую константу упругости [13].

Хорошо известно [8], что при больших пластических деформациях нарушается соответствие напряженного и деформированного состояний, которое лежит в основе условия (5). Если принять условие (6), то переходный коэффициент в общем случае будет определяться зависимостью

$$\beta = \frac{2}{3} \left[2 + \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_{1(3)}} \right]. \quad (8)$$

Здесь $\delta_{1(3)}$ — наибольшее по абсолютному значению главное удлинение.
 δ_2 — среднее главное удлинение.

В случае осадки прямоугольных призм между параллельными плитами соотношение деформаций можно заменить соотношением поперечных размеров призмы. Если b — ширина, а l — длина основания ее, то

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{2l + b}{l + b}. \quad (9)$$

Тогда напряжение осадки прямоугольной призмы любого поперечного сечения q может быть определено через нормальное напряжение квадратной призмы ($l = b$) из того же материала, такой же высоты при тех же температурно-скоростных условиях деформирования σ :

$$q = \beta \sigma = \frac{2}{3} \cdot \frac{2l + b}{l + b} \sigma. \quad (10)$$

На рис. 3 приведены кривые течения при обжатии квадратной призмы 1 и двух прямоугольных призм $b_0:l_0 = 0,2$ и $0,1$ (кривые 2 и 3).

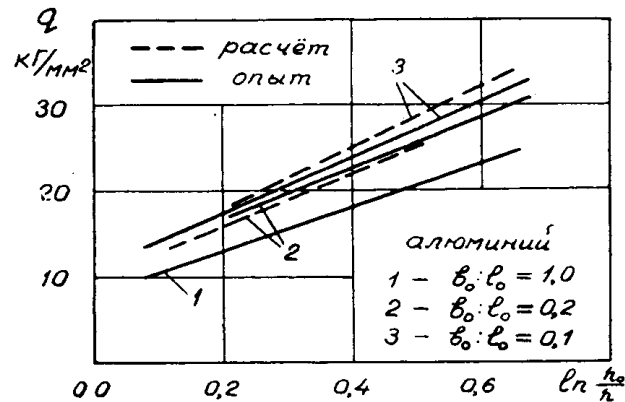


Рис. 3. Проверка уравнения (8) по результатам обжатия прямоугольных призм

Пунктиром проведены кривые течения по уравнению (10) для этих же призм. Совпадение расчетных и фактических значений вполне удовлетворительно.

Средняя величина максимальных напряжений при обычном растяжении за весь период деформации от начала до ее последней конечной стадии

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{1}{g} \int_0^g F(g) dg. \quad (11)$$

Руководствуясь зависимостями (2) и (3), получим

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{A}{m+1} g^m, \quad (12)$$

$$\tau_{\text{ср}} = \tau_0 (1 + \alpha g). \quad (13)$$

На основании (6) сопротивление пластической деформации при сложном напряженном состоянии будет определяться зависимостями

$$\tau'_{\text{ср}} = \beta \tau_0 (1 + \alpha g). \quad (14)$$

$$\tau'_{\text{ср}} = \beta \frac{A}{m+1} g^m. \quad (15)$$

В процессе резания, как правило, осуществляется плоская деформация (уширения стружки нет). Тогда сопротивление резанию можно рассчитать по формулам:

$$\tau_{\text{рез}} = \frac{4}{3} \frac{A}{m+1} g^m, \quad (16)$$

$$\tau_{\text{рез}} = \frac{4}{3} \tau_0 (1 + \alpha g). \quad (17)$$

А. М. Розенберг и А. Н. Еремин [10], сопоставляя процессы сжатия и резания, принимают за меру деформации условный относительный сдвиг (ϵ), который, как известно, связан с логарифмическим сдвигом следующей зависимостью

$$\epsilon = 2 \operatorname{sh} \frac{g}{2}. \quad (18)$$

На основании (17) сопротивление резанию можно будет определить по формуле

$$\tau_{\text{рез}} = \frac{4}{3} \tau_0 (1 + c\epsilon). \quad (19)$$

В табл. 3 приведены характеристики сопротивления сжатию (τ_0 и c) ряда сталей. Там же указано фактическое сопротивление резанию этих сталей для крайних значений диапазона изменений степени пла-

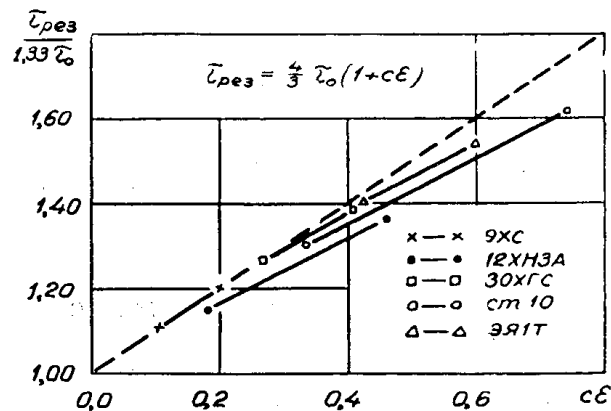


Рис. 4. Результаты опытов А. М. Розенберга по резанию металлов в безразмерных координатах

стической деформации при резании. На основании приведенных данных на рис. 4 дано сопоставление фактического сопротивления резанию с расчетом по формуле (19).

В опытах Н. Н. Зорева [2] по резанию металлов часто отмечается снижение фактических касательных напряжений с ростом деформации, что противоречит любому закону упрочнения. Этот факт объясняется

тем, что с увеличением степени пластической деформации (усадки стружки) происходит увеличение уширения стружки, что свидетельствует о все большем отличии схемы деформации от плоской. В этом случае коэффициент β , определяемый по формуле (8), будет меньше своего предельного значения. Уменьшение коэффициента β скажется сильнее, чем увеличение среднего касательного напряжения за счет увеличения степени деформации. Соотношение деформаций в формуле (8) можно заменить соотношением уширения к усадке стружки, что позволит более точно рассчитать сопротивление обрабатываемого металла резанию.

Таблица 3

Зависимость отношения сопротивления резанию к условному пределу текучести от величины относительного сдвига по опытам А. М. Розенберга и А. Н. Еремина [10]

Сталь	Условн. предел текучести, τ_0 кг/мм ²	Коэффиц. упрочнения, C	Относительн. сдвиг, ε	Удельн. работа деформации a , кг мм/мм ³	Сопротивл. резанию, $\tau_{рез}$ кг/мм ²	$\frac{\tau_{рез}}{1,33 \tau_0}$
9ХС	47	0,055	2,0	140	70	1,12
			3,8	290	76,5	1,21
12ХНЗА	39	0,085	2,0	120	60	1,15
			5,5	380	69	1,36
ЗОХГС	40	0,108	2,5	170	68	1,27
			3,8	280	74	1,39
Ст. 10	26	0,148	2,2	100	45,5	1,30
			5,0	280	56	1,61
ЭЯ1Т	39	0,240	1,7	123	72	1,39
			2,5	200	80	1,54

Изложенное позволяет сделать два вывода:

1. Пластическая деформация при обработке металлов давлением и резанием подчиняется одним и тем же законам.
2. Пластическое течение реальных металлов в большом интервале степеней деформации вполне удовлетворительно описывается уравнением (6).

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Бочарова. Напряженное состояние трубы, находящейся под действием равномерного внутреннего давления и продольной силы при больших пластических деформациях. Сб. «Расчеты на прочность», вып. 9, Машгиз, 1963.
2. Н. Н. Зорев. Расчет проекций силы резания. Машгиз, 1958.
3. Ю. Е. Бондарев. Кривые сжатия в безразмерных координатах. Заводская лаборатория, № 2, 1962.
4. Ю. И. Яги и Н. М. Митрохин. О систематическом характере отклонений от законов пластичности. ДАН СССР, т. 135, № 4, 1960.
5. А. А. Лебедев, Г. С. Писаренко. Исследование прочности стали IX18H9T в условиях сложного напряженного состояния при температурах до 820°C. Труды второго научно-технического совещания. Вопросы высокотемпературной прочности в машиностроении. Киев, 1963.
6. Ю. И. Синельников. Применение энергетического условия пластичности в теории обработки металлов давлением. Известия вузов, Машиностроение, № 8, 1963.
7. С. И. Ратнер. Прочность и пластичность металлов. Оборонгиз, 1949.
8. Г. А. Смирнов-Аляев. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Машгиз, 1961.

9. П. О. Пашков. Пластичность и разрушение металлов. Судпромгиз, Л., 1949.
 10. А. М. Розенберг, А. Н. Еремин. Элементы теории процесса резания металлов. Машгиз, 1956.
 11. А. Надаи. Пластичность и разрушение твердых тел. Изд. иностр. лит., 1954.
 12. Г. А. Дощинский. Теория предельного упругого состояния. Известия Томского политехнического института, т. 85, 1957.
 13. Г. П. Зайцев. Новая безразмерная константа упругости, коэффициент поперечной деформации и формулы для подсчета больших деформаций. Труды Сибирского физико-технического института, вып. 34, 1955.
 14. Л. М. Седоков. Безразмерные параметры сопротивления металлов пластической деформации. Заводская лаборатория, 1964, № 10.
-