

СОПОСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗАНИЯ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

В. Н. ВЕРЕЗУБ

В процессе резания металлов имеют место физические явления, подобные тем, которые происходят при пластическом деформировании и разрушении материалов под действием нагрузки: растяжение, сжатие, срез, вдавливание шарика. Проф. В. Д. Кузнецов, В. А. Кривоухов, А. М. Розенберг считают, что процесс резания очень близок процессу пластического сжатия и определяется его характеристиками, другие авторы проводят аналогию между характеристиками резания и растяжения или среза.

Поставленную задачу, очень важную для создания физической теории резания металлов, можно решать экспериментально различными путями; общим является совместное изучение процесса резания и другого вида деформации. Если результат эксперимента подтвердит совпадение этих видов деформации, из которых одна хорошо изучена, то это даст возможность познать другой вид деформации.

Мы исследовали процесс резания металла совместно с растяжением, сжатием, испытанием на твердость того же металла. Полученные в результате опытов характеристики процесса резания сопоставляли с характеристиками механических свойств обрабатываемого материала.

Для того чтобы получить по возможности большее число характеристик материала, мы обрабатывали резанием и испытывали его механически при различных температурах нагрева от 20 до 600° через каждые 100°. Обрабатываемым материалом служила сталь 20, химический состав которой приведен в таблице 1.

Таблица 1

Марка стали	C	Mn	Si	P	S
20	0,18	0,52	0,2	0,038	0,023

Механические свойства обрабатываемого материала исследовались при различных температурах нагрева на деформации растяжения, сжатия, вдавливания шарика.

Опыты на растяжение проводились в Харьковском институте металлов на 50-тонной машине с автозаписью диаграммы растяжения. В таблице 2 показаны результаты испытания при различных температурах нагрева.

Для испытания на сжатие использован метод канд. техн. наук А. К. Баева, согласно которому проводилось сжатие микрообразцов на

Таблица 2

T°C	20	100	200	300	400	500	600
σ_B кг/мм ²	55	48	55	56,5	42	30	17
σ_s кг/мм ²	29,7	28	27,4	27,4	21	18	12
ψ %	52	51	45,3	51	59,3	70	77
ξ %	26,5	22	20	22,5	29,8	37	46
σ_{Φ} кг/мм ²	92	93,4	93	95	75,7	57	35,6
$\sigma_{\text{ш}}$ кг/мм ²	64	62	66	69	52	39	22

строгальном станке со скоростью, равной скорости резания. В нашем случае образцы предварительно нагревались до необходимой температуры. Пуансоном служила пластинка твердого сплава, зажатая в специальной державке, которая крепилась в супорте станка. Перед опытом пластинка нагревалась до температуры образца.

В таблице 3 представлены значения условного предела текучести σ_0 , показателя политропы m и относительной деформации ϵ_p для сжатия при различных температурах.

Таблица 3

T°C	σ_0 кг/мм ²	$\epsilon_p = \frac{h_s - h_0}{h_0} 100$	m	
			$\alpha = 1$	$\alpha = 2$
20	60	14	1,22	1,22
200	62,5	15	1,23	1,23
400	50	12	1,15	1,15
500	45	10	1,1	1,1
600	42	10	1,1	1,1

Определение твердости испытуемой стали при различных температурах производилось на специально оборудованном для этой цели прессе Бринелля (табл. 4).

Таблица 4

T°C	20	100	200	300	400	500	600
H_0	142	136	147	133	118	100	84

Резание при различных температурах осуществлялось на строгальном станке свободным методом. Для опытов применялись образцы из указанной стали размерами $70^{-0,1} \times 60 \times 3$ мм.

Нагрев образца осуществлялся за счет источников тепла, которые располагались с двух сторон образца. Источниками тепла служили нагревательные элементы, изготовленные из жаропрочной стали; они представляли собой прямоугольные пластины, вдоль которых сверлились два сквозных отверстия, куда вставлялась спираль из нихрома $\varnothing 2$ мм. Спираль нагревалась сильным током от понижающего трансформатора с регулированием силы тока; температура нагрева контролировалась закладной термопарой.

Резание производилось резцами твердого сплава T15K6 с механическим креплением пластинок в специальной державке для нагрева пластинок до температуры образца. Пластинки твердого сплава нагревались сильным током от трансформатора, температура контролировалась

лась термопарой. Геометрия резцов была принята следующая: $\gamma = 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 0^\circ$; $\alpha = 12^\circ$; $\lambda = 0^\circ$. Скорость резания оставалась постоянной — $v = 3$ м/мин, подача изменялась — $s = 0,05 \div 1,2$ мм.

Изучалось усилие резания P_z , кг, усадка стружки K , удельное давление $\sigma_v = \frac{P_z}{f_0}$ кг/мм²; эффективное напряжение $\sigma_e = \frac{P_z}{f_0 K}$ кг/мм²,

где P_z — усилие резания,

f_0 — площадь среза,

K — усадка стружки.

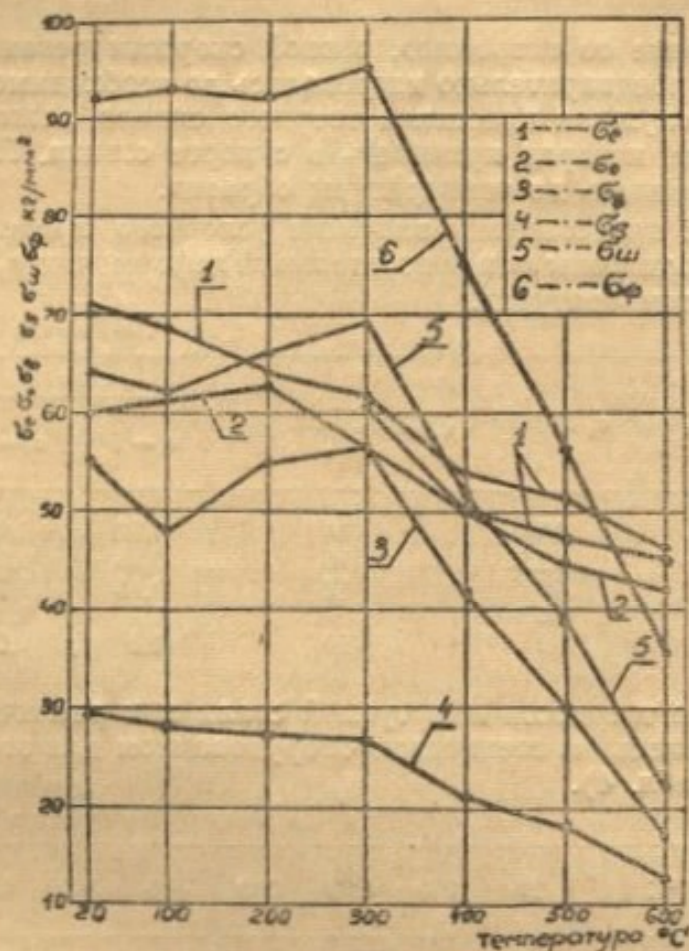


Рис. 1.

На рисунке 1 представлены кривые зависимости предела прочности σ_v , предела текучести σ_s , напряжения в момент образования шейки при разрыве $\sigma_{ш}$, фактического напряжения разрыва σ_f , условного напряжения сжатия $\sigma_{сж}$, эффективного напряжения резания σ_e от температуры.

На графике (рис. 1) значения эффективного напряжения взяты для передних углов $\gamma = 10$ и 30° и подач свыше 0,5 мм. Для подач свыше 0,5 мм σ_e остается величиной постоянной, отличаясь на 5—6%, что позволяет усреднить его величину. Из рисунка видно, что температурные кривые эффективного напряжения и механических характеристик имеют приблизительно одинаковый ход. Это говорит о том, что напряжение, полученное при деформации резанием, имеет одну и ту же природу с напряжениями, полученными при сжатии и разрыве.

В. Д. Кузнецов пишет, что эффективное напряжение является каким-то предельным напряжением, при котором происходит интенсивное

течение и выше которого не могут подняться внутренние напряжения в поликристалле, причем начиная с некоторой степени деформации δ становится постоянным. Следовательно, в пределе эффективное напряжение должно приближаться к разрушающему.

Сопоставление температурного хода кривых σ_e и механических характеристик подтверждает правильность мысли Кузнецова о том, что эффективное напряжение может быть характеристикой материала, как условное напряжение при сжатии или напряжение разрушения при растяжении. Таким образом, вводится новая характеристика процесса резания, значительно лучше его характеризующая, чем удельное давление σ_v , которое является переменным при всех условиях.

В таблице 5 представлены отношения механических характеристик к эффективному напряжению резания при различных температурах и передних углах.

Таблица 5

Отношение напряжений	T°	T°С					
		20	100	200	400	500	600
$\frac{\sigma_B}{\sigma_e}$	0	—	—	—	0,75	0,57	0,36
	10	0,76	0,8	0,9	0,79	0,61	0,365
	20	0,76	0,77	0,92	0,8	0,61	0,365
	30	0,72	0,72	0,75	0,83	0,63	0,37
$\frac{\sigma_S}{\sigma_e}$	0	—	—	—	0,375	0,346	0,27
	10	0,43	0,466	0,45	0,396	0,37	0,27
	20	0,435	0,45	0,46	0,4	0,37	0,27
	30	0,418	0,42	0,375	0,41	0,39	0,28
$\frac{\sigma_{III}}{\sigma_e}$	0	—	—	—	0,93	0,75	0,47
	10	0,96	1,03	1,08	0,98	0,8	0,473
	20	0,98	0,995	1,1	0,99	0,8	0,48
	30	0,91	0,93	0,9	1,02	0,84	0,48
$\frac{\sigma_{\Phi}}{\sigma_e}$	0	—	—	—	1,35	1,1	0,76
	10	1,37	1,55	1,5	1,42	1,16	0,763
	20	1,38	1,49	1,53	1,44	1,46	0,766
	30	1,3	1,38	1,26	1,5	1,22	0,773
$\frac{\sigma_0}{\sigma_e}$	0	—	—	—	0,9	0,87	0,9
	10	0,9	—	0,99	0,93	0,92	0,9
	20	0,9	—	0,98	0,95	0,92	0,91
	30	0,85	—	0,99	0,98	0,96	0,92

Согласно таблице, отношение характеристик механических свойств материала к эффективному напряжению при резании имеет различное значение для различных температур.

Отношение предела прочности к эффективному напряжению в интервале температур 20 ÷ 400° сохраняется примерно постоянным. Дальнейшее повышение температуры вызывает значительное снижение отношения, так как предел прочности резко падает, начиная с температуры 400° и выше.

Отношение предела текучести $\frac{\sigma_s}{\sigma_e}$ также сохраняется приблизительно постоянным в интервале температур 20—400°, а затем с повышением температуры снижается, но значительно медленнее, чем в случае отношения σ_{III}/σ_e ; аналогично изменяется отношение напряжения

в момент образования шейки $\sigma_{ш}/\sigma_e$ для исследуемого диапазона температур.

Кривая $\sigma_{\phi} = f(T^{\circ})$ на протяжении от 20 до 500° располагается выше кривой $\sigma_e = f(T^{\circ})$. Значения фактического напряжения при разрыве превышают значения σ_e , приближаясь к последним при температуре 500° при 600° значения σ_{ϕ} ниже величины эффективного напряжения резания. Отношение σ_{ϕ}/σ_e для диапазона исследуемых температур изменяется.

Температурный ход кривой условного напряжения при сжатии σ наиболее близко приближается к температурному ходу кривой эффективного напряжения. Отношение σ_0/σ_e остается почти постоянным на всем протяжении температур и не имеет резких изменений.

В таблице 6 представлено отношение твердости H_e к эффективному напряжению (H_e/σ_e).

Таблица 6

	T°C	20	100	200	400	500	600
$H_e/\sigma_e \cdot 10^3$	0	—	—	—	2,1	1,93	1,8
	10	2,12	2,28	2,43	2,2	2,04	1,82
	20	2,13	2,2	2,46	2,25	2,04	1,82
	30	2	2,05	2,01	2,3	2,15	1,85

В пределах температур 20 ÷ 400° отношение H_e/σ_e сохраняется постоянным, несколько снижаясь с дальнейшим повышением температуры. Это снижение коэффициента связано с более медленным снижением σ_e от температуры, чем твердости.

Рассматривая резание металлов, как процесс пластического сжатия, В. А. Кривоухов предлагает теоретическую формулу для определения усилия при свободном резании:

$$P_z = \sigma_0 ab K^m \text{ кг,}$$

- где σ_0 — условный предел текучести;
 $ab_{\text{мм}}$ — размеры снимаемого слоя;
 K — продольная усадка стружки;
 m — коэффициент политропы сжатия.

Располагая данными характеристик сжатия и усадки стружки, полученными экспериментально, произведем вычисленные усилия P_z по формуле и сопоставим со значениями P_z , зарегистрированными динамометром.

В таблице 7 представлены отклонения в процентах значений P_z , вычисленных по формуле, к значениям P_z , зарегистрированным динамометром для температур 20, 200, 400, 500, 600°, различных подач и передних углов.

Из таблицы видно, что при температуре 20° в диапазоне подач свыше 0,4 ÷ 0,5 мм значения P_z , полученные по формуле, относительно близко подходят к P_z фактическому. Значения P_z , вычисленные теоретически для тонких стружек с подачами 0,05—0,3, меньше P_z , зарегистрированного динамометром. При температуре 200° наблюдаются большие отклонения P_z теоретического от фактического, причем величина P_z , вычисленного по формуле, превышает значения P_z фактического.

Таблица 7

T°C	γ°	S, мм													
		0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	
20	10	5	3	10	11	12									
	20	14	10	5	3	6	7								
	30	18	15	5	6	1	2								
200	10	2	13	25	25	20									
	20	14	4	8	8	15	16								
	30	18	2	9	13	12	15								
400	10	37	25	11	2	2	2	4	5						
	20	30	18	6	5	4	4	6	5	4	4	10	2		
	30	27	14	1	4	3	1	6	6	7					
500	10	48	40	31	24	11	10	9	10						
	0	50	36	24	9	11	7	4	4	3					
	10	40	33	18	17	9	8	7	7	8	5	5	6	6	
	20	42	30	21	10	7	10	5	6	5	7	7	7	7	5
600	30	38	32	17	14	8	7	7	6	6					
	10	59	45	27	19	14	12	11	12						
	0	51	35	22	11	7	3	3	2	1					
	10	45	37	25	20	8	6	6	8	9	6	5	6	5	
	20	48	33	18	14	10	9	8	7	8	5	7	6	7	
	30	45	35	16	13	9	7	6	7	7					

По мере повышения температуры до 400 ÷ 600° удовлетворительное совпадение результатов отмечается только при снятии толстых стружек, начиная с подач 0,4 мм и выше. В интервале тонких стружек наблюдается значительное отклонение результатов, причем P_z , теоретически подсчитанное, всегда меньше P_z , зарегистрированного динамометром.

Из вышеизложенного следует, что процесс резания обусловлен определенными механическими свойствами обрабатываемого материала, из которых ближе всего подходят характеристики пластического сжатия: условный предел текучести, показатель политропы m .

Процесс резания с известными допущениями можно рассматривать как процесс пластического сжатия, если исключить зону тонких стружек, где происходит сильное искажение величины главной составляющей усилия резания P_z , производящей сжатие срезаемого слоя, вследствие действия сил трения о переднюю и заднюю грани реза.

Следовательно, зная характеристики обрабатываемого материала, полученные при сжатии, как σ_0 , m , ϵ_p , мы можем иметь не только качественное, но и количественное представление о характеристиках при его резании: усилие резания, усадка стружки, эффективное напряжение. Определенный параллелизм между характеристиками резания и сжатия дает возможность производить теоретические подсчеты усилия резания, эффективного напряжения, усадки стружки при сравнительно больших сечениях стружки.

Несовпадение эффективного напряжения σ_e с фактическим напряжением разрыва σ_ϕ в пределах температур 20—400° можно объяснить различным характером распределения напряжения пластического деформирования в случае резания и растяжения.

При деформации образца растяжением упрочнение в разрушенном сечении будет одинаково. По данным С. И. Ратнера, распределение твер-

дости по Виккерсу в разрушенном сечении после испытания на растяжение стали 50 равномерное; по величине твердость — одинаковая.

В случае деформации резанием упрочнение стружки, как мы установили измерением микротвердости, по сечению неравномерно, достигая максимума вблизи режущего лезвия и уменьшаясь к наружной стороне стружки. Изменение подачи также вызывает значительное изменение характера распределения упрочнения. При деформации растяжением для разрушения необходимо в любой точке сечения иметь разрушающее напряжение, а при резании достаточно только в зоне металла, прилегающего к режущей кромке.

Рассчитывая эффективное напряжение по методике, предложенной Кузнецовым, получаем какое-то среднее напряжение, значение которого меньше разрушающего.

Характер распределения напряжений по сечению стружки меняется с повышением температуры до 400—600°. Повышение температуры, с одной стороны, уменьшает величину разрушающего напряжения, с другой стороны, способствует более равномерному распределению напряжений по сечению стружки.

При разрыве влияние температуры выразится только в уменьшении разрушающего напряжения. В результате эффективное напряжение при температурах 500—600° более близко к разрушающему.

Сопоставление усилий, зарегистрированных динамометром и рассчитанных по формуле, показывает, что аналитическая формула В. А. Кривоухова, построенная на базе политропического уравнения сжатия, в основном правильно интерпретирует процесс резания. Как расчетную, эту формулу можно применять при снятии толстых стружек и низких скоростях резания.

При срезании тонких стружек с подачей 0,05—0,4 мм, кроме преодоления сопротивления обрабатываемого материала сжатию, усилие P_z затрачивается в значительной мере на преодоление сил трения между сходящей стружкой и передней гранью резца, а также на деформацию обработанной поверхности. Нарушается соответствие между резанием металла и процессом его пластического сжатия и как следствие этого — результаты, полученные по формуле, отличаются от действительных.

ВЫВОДЫ

1. Наблюдается определенный параллелизм между эффективным напряжением резания и условным пределом текучести при сжатии на всем диапазоне температур. Значения эффективного напряжения резания близки значениям условного предела текучести сжатия.
2. Наблюдается определенный параллелизм между эффективным напряжением резания и твердостью H_B на всем диапазоне температур.
3. Значения эффективного напряжения при резании выше напряжений предела прочности и ниже фактических напряжений при разрыве σ_{ϕ} .
4. В области толстых стружек (подача $> 0,4$ мм) отмечается удовлетворительное совпадение результатов усилия резания P_z , вычисленного по формуле $P_z = \sigma_0 ab K^m$, с усилиями, полученными экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

- В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела, Т. III, 1946.
 В. А. Кривоухов. Деформирование поверхностных слоев металла в процессе резания. М., Машгиз, 1945.
 А. М. Розенберг и А. Н. Еремич. «Вестник машиностроения», 1953, № 8.
 С. И. Ратнер. Прочность и пластичность металлов. М., Машгиз, 1949.