

Н. И. РЕЗНИКОВ, В. И. ЛЕПИЛИН

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ РЕЗАНИЯ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Благодаря целому ряду физико-механических свойств [1] малопластичный цинковый сплав ЦАМ4-Г имеет целый ряд особенностей при обработке резанием. Некоторые явления в процессе стружкообразования протекают настолько рельефно, что это позволяет полнее раскрыть их физическую сущность.

УСАДКА СТРУЖКИ

Одной из важнейших характеристик процесса резания является деформация стружки, определяемая коэффициентами уширения, поперечной и продольной усадки. Последняя нами определялась экспериментально методом взвешивания на аналитических весах в сочетании с измерением длины стружки при десятикратном увеличении. С целью сопоставления, одновременно применялся и расчетный метод с использованием формулы [2]:

$$k_{l \text{ расч.}} = k_a \cdot k_b \left(\frac{1+c}{2} \right), \quad (1)$$

где k_a — коэффициент утолщения стружки $k_a = \frac{a_1}{a}$;

k_b — коэффициент уширения стружки $k_b = \frac{b_1}{b}$;

c — коэффициент сплошности стружки $c = \frac{a_2}{a_1}$;

a — толщина среза, для продольного течения $a = s \cdot \sin \varphi$;

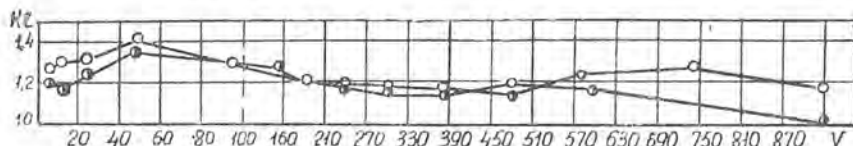
a_1 — толщина стружки по выступам элементов;

a_2 — толщина стружки по впадинам между элементами;

b — ширина среза, $b = \frac{l}{\sin \varphi}$;

b_1 — ширина стружки.

Для определения влияния скорости резания, переднего угла и подачи на продольную усадку стружки проведены опыты при свободном и несвободном резании. Результаты опытов при несвободном резании для серии скоростей приведены в таблице 1 и на фиг. 1.



Фиг. 1. Зависимость коэффициента продольной усадки от скорости резания.

Материал ЦАМ4-1; $l = 2$ мм; $s = 0,21$ мм/об; резец ВК8; $\gamma = 16^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$.
○ — свободное резание; ◐ — несвободное резание.

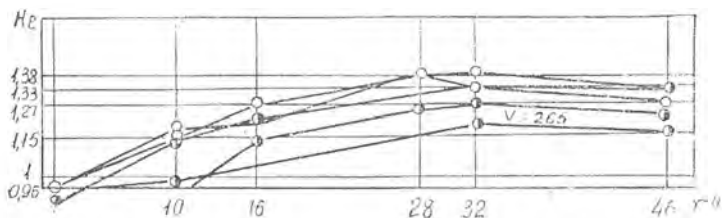
Из графиков видно, что коэффициенты усадки стружки при свободном и несвободном резании численно близки, а характер их изменения одинаков. При изменении скорости резания от 4 до 960 м/мин коэффициент продольной усадки стружки изменяется от 1,41 до 1.

Увеличение коэффициента продольной усадки стружки в диапазоне скоростей 15—50 м/мин может иметь место по следующей причине. При комнатной температуре сплав обладает низкой пластичностью ($\delta = 2,25\%$ и $\psi = 3,30\%$). С повышением температуры до 150—200°C пластичность сплава увеличивается ($\delta = 20\%$ и $\psi = 55,60\%$). При дальнейшем повышении температуры относительное удлинение и сужение уменьшается. Исследование температуры в зоне указанных скоростей (см. ниже) показывает, что она достигает величин 150—220°C. Следовательно, максимальная усадка имеет место при температурах, соответствующих наибольшей пластичности обрабатываемого материала. Дальнейшее понижение усадки стружки связано с уменьшением пластичности сплава и коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью резца.

Графики, приведенные на фиг. 2, показывают, что с увеличением переднего угла до 28—32° продольная усадка стружки возрастает. На этой же фигуре можно заметить на-

Параметры стружек сплава ЦАМ4-1 (несвободное резание)

№ п/п	$\frac{v_{нк}}{v}$	t , мм	$\frac{60}{v_{с}}$	γ°	φ°	b , мм	b_1 , мм	$k_b = \frac{b_1}{b}$	a , мм	a_1 , мм	a_2 , мм	$k_a = \frac{a_1}{a}$	$\frac{a_2}{c} = \frac{a_1}{a_1}$	$\frac{1+c}{2}$	$k_a \cdot k_b$	$k_{гас.}$	$k_{эксп.}$
1	5,95									0,25	0,11	1,55	0,48	0,74	1,58	1,17	1,27
2	9,54									0,25	0,14	1,69	0,56	0,78	1,72	1,34	1,32
3	11,9									0,26	0,14	1,75	0,54	0,77	1,78	1,37	1,3
4	23,8									0,27	0,14	1,82	0,52	0,76	1,85	1,4	1,32
5	47,7									0,29	0,16	1,96	0,55	0,775	2	1,55	1,41
6	95,4	2	0,21	16	45	2,83	2,9	1,02	0,148	0,26	0,14	1,75	0,54	0,77	1,78	1,37	1,3
7	190,5									0,24	0,13	1,62	0,54	0,77	1,65	1,27	1,21
8	300									0,23	0,12	1,55	0,52	0,76	1,58	1,2	1,19
9	380,5									0,23	0,11	1,55	0,48	0,74	1,58	1,17	1,17
10	477									0,22	0,11	1,49	0,55	0,775	1,52	1,18	1,14
11	580									0,22	0,11	1,49	0,55	0,775	1,52	1,18	1,24
12	742									0,21	0,11	1,42	0,57	0,785	1,45	1,14	1,27
13	926									0,21	0,11	1,42	0,57	0,785	1,45	1,14	1,18

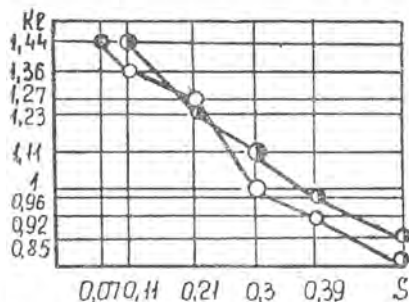


Фиг. 2. Зависимость коэффициента продольной усадки от переднего угла реза.

Материал ЦАМ4-1. $v = 296$ м/мин.; $t = 2$ мм, $s = 0,21$ мм/об; резец ВК8, $\varphi = 45^\circ$. \ominus — свободное резание; \circ — несвободное резание.

личие так называемой «отрицательной» усадки при малых передних углах. Сущность этого явления, впервые правильно объясненного в работе [2], заключается в том, что малопластичные металлы дают резко элементную стружку, и поэтому коэффициент сплошности стружки с меньше единицы.

В связи со сказанным находит объяснение и характер изменения усадки стружки в зависимости от переднего угла реза. С увеличением переднего угла в связи с облегчением процесса резания величина $K_{a1} = \frac{a_1}{a} \cdot \frac{b_1}{b}$ уменьшается, и следовало ожидать уменьшения продольной усадки k_l . Однако это не происходит, так как с увеличением переднего угла увеличивается угол скалывания β_1 , а следовательно, уменьшается относительный сдвиг элементов, благодаря чему увеличивается сплошность стружки и, как результат этого, увеличивается коэффициент продольной усадки.



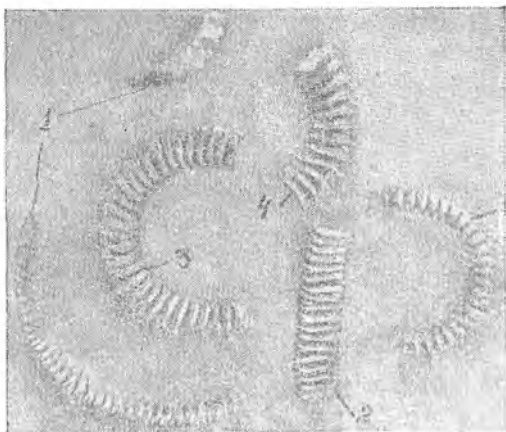
Фиг. 3. Зависимость коэффициента продольной усадки от подачи.

Материал ЦАМ4-1; $v = 296$ м/мин.; $t = 2$ мм; Резец ВК8; $\gamma = 16^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\alpha = 10^\circ$, $\lambda = 0^\circ$. \ominus — свободное резание; \circ — несвободное резание.

Из фиг. 3 видно, что с увеличением подачи коэффициент продольной усадки стружки, уменьшаясь, может достигать величины $k_l = 0,77$, т. е. имеет место «отрицательная» усадка ($k_l < 1$).

Изучение стружек (фиг. 4), полученных при больших подачах, совершенно определенно подтверждает вывод [2] о том, что «отрицательная» усадка стружки не может являться показателем дефор-

мации в зоне резания. Здесь хорошо видно, что отдельные элементы не только сдвинуты друг относительно друга, но, кроме того, между элементами имеются большие зазоры при наличии довольно прочной связи на тонком прирезцовом слое стружки, формирование которого заканчивается после образования элементов.



Фиг. 4. Внешний вид стружек при больших подачах.

Материал ЦАМ4-1; Резец ВК8; $\gamma = 16^\circ$; $\varphi = 45^\circ$;
 $\lambda = 0^\circ$.

1 — $t = 2$ мм; $s = 2,08$ мм/об;

2 — $t = 4$ мм; $s = 2,08$ мм/об;

3 — $t = 4$ мм; $s = 3,12$ мм/об;

4 — $t = 4$ мм; $s = 3,5$ мм/об.

Сопоставление коэффициентов продольной усадки стружки, найденных экспериментально, и расчетом по формуле (1)

дает хорошее совпадение, что видно из таблицы 1, и говорит в пользу соображений, заложенных в расчетную форму.

УГОЛ СКАЛЫВАНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ

Исследование влияния различных факторов на угол скалывания проводилось на микрофотографиях корней стружек. Для примера на фиг. 5 приведен подобный снимок, сделанный при девятистократном увеличении.

Зависимость угла скалывания β_1 от переднего угла представлена графиком фиг. 6, из которого видно, что с увеличением переднего угла угол скалывания непрерывно возрастает. В пределах $\gamma = 10-46^\circ$ эту зависимость можно принять линейной и выразить уравнением:

$$\beta_1 = 35^\circ + 0,4 \gamma$$

или

$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{2}{5} \gamma - 10^\circ. \quad (2)$$

Сопоставляя (2) с известной формулой К. А. Зворыкина

$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma - \rho_1 - \rho_2}{2} \quad (3)$$

МОЖНО ВИДЕТЬ, ЧТО

$$\begin{aligned} \frac{2}{5} \gamma - 10^\circ &= \\ &= \frac{\gamma - \rho_1 - \rho_2}{2}. \end{aligned}$$

Решив последнее равенство относительно ρ_1 , будем иметь

$$\rho_1 = \frac{\gamma}{5} + 20^\circ - \rho_2, \quad (4)$$

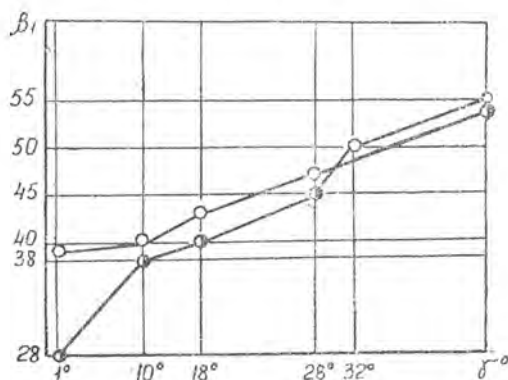
где ρ_1 — угол внешнего трения;

ρ_2 — угол внутреннего трения.

Используя экспериментальные дан-

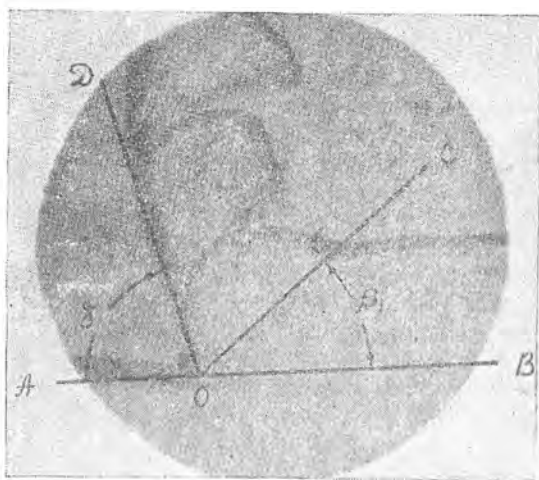
ные Бриджмена, И. В. Крагельский подсчитал, что для цинка $\rho_2 = 1^\circ 10'$ или $\rho_2 = \operatorname{tg} \rho_2 = 0,02$.

Приравняв эту величину для сплава ЦАМ4-1 (95% Zn) с помощью формулы (4) найдем:



Фиг. 6. Зависимость угла скалывания от переднего угла.

Материал ЦАМ4-1. $v = 60,6$ м/мин; $t = 2$ мм; $s = 0,21$ мм/об. Резец ВК8, $\varphi = 45^\circ$; $\lambda = 0$; ⊙ — свободное резание; ○ — несвободное резание.



Фиг. 5. Корень стружки $\times 90$.
Материал ЦАМ4-1. Резец ВК8. γ — угол резания;
 ρ_1 — угол скалывания.

при $\gamma = 10^\circ$

$$\rho_1 = \operatorname{tg} \rho_1 = 0,38;$$

при $\gamma = 45^\circ$

$$\rho_1 = \operatorname{tg} \rho_1 = 0,52.$$

Полученные величины коэффициентов внешнего трения следует рассматривать как приближенные, так как с изменением переднего угла меняются условия гидростатического давления, что вызывает изменение ρ_2 . Однако подсчитанные величины, по-видимому, близки к действительным

и отражают характер их изменения с увеличением переднего угла.

Возрастание коэффициента трения с увеличением переднего угла объясняется тем, что при этом уменьшается нормальное давление (напряжение) на передней грани резца при почти неизменном касательном. Последнее же, по современным взглядам, связано с явлением трения на контактных поверхностях.

Исследование зависимости угла скалывания от скорости резания показывает, что в интервале скоростей 6—50 м/мин нет определенной закономерности в изменении β_1 , что объясняется наличием в области указанных скоростей неустойчивого пароста. Начиная с $v=50$ м/мин, величина угла скалывания β_1 с увеличением скорости резания возрастает примерно по линейному закону, что связано с уменьшением коэффициента внешнего трения (от $\mu_1=0,5$ до $\mu_1=0,12$). Как видно из излагаемого ниже, увеличение скорости от 6 до 487 м/мин приводит к возрастанию температуры резания от 75 до 370°C, что приводит к уменьшению предела текучести σ_s^t обрабатываемого металла более чем в 4 раза ($\sigma_s^{100^\circ} = 13,7$ кг/мм², $\sigma_s^{350^\circ} = 3,1$ кг/мм²). Последнее приводит к резкому уменьшению сдвиговых контактных напряжений на передней поверхности и, следовательно, к уменьшению коэффициента трения.

Обращает на себя внимание тот факт, что при скоростях резания выше 480—490 м/мин температура практически стабилизируется (см. ниже фиг. 9). Следовательно, учитывая сказанное выше, можно полагать, что при $\gamma=16^\circ$ и $s=0,21$ мм/об угол скалывания $\beta_1 \approx 45—49^\circ$ является предельным. В связи с этим увеличение скорости резания выше 480—490 м/мин не должно приводить к изменению сил резания. Последнее подтверждается соответствующими опытами (см. ниже).

Увеличение подачи приводит к увеличению угла скалывания, что также связано с уменьшением коэффициента трения. По нашим подсчетам при $s=0,07$ мм/об $\mu_1=0,68$, а при $s=0,39$ мм/об $\mu_1=0,17$.

Исследование длины контакта стружки с передней поверхностью резца дало возможность получить следующую зависимость:

$$l_k = 3 \cdot a^{0,52} \cdot v^{-0,2} \cdot \gamma^{-0,17}, \text{ мм.} \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что с увеличением толщины среза ($a = s \cdot \sin \varphi$) увеличивается длина контакта. Так, например, при $s = 0,07$ мм/об. ($v = 61,4$ м/мин. и $\gamma = 16^\circ$) $l = 0,18$ мм, а при $s = 0,39$ мм/об. $l_n = 0,42$ мм. Указанным подачам соответствуют силы резания $P_z = 15$ кг и $P_z = 51,5$ кг и нормальные контактные давления при $b = 2,9$ мм соответственно равные: $\sigma_N = 25$ кг/мм² и $\sigma_N = 41,7$ кг/мм².

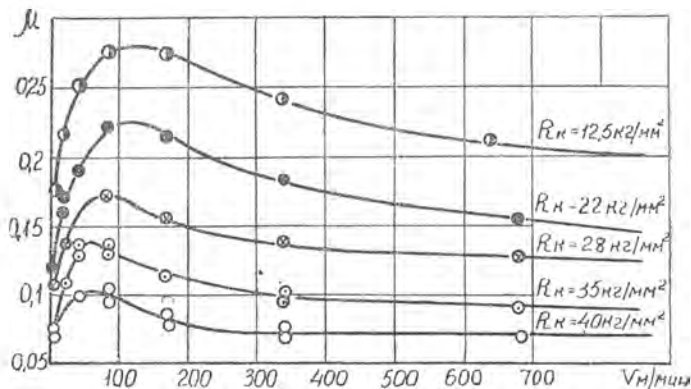
Если представить теперь, что коэффициент трения — это отношение касательного напряжения к нормальному

$$\mu_1 = \frac{\tau}{\sigma_N}, \quad (6)$$

то причиной интенсивного убывания μ_1 с увеличением подачи является увеличение δ_{IV} и некоторое уменьшение τ в связи с увеличением температуры резания (в нашем случае от $T^\circ = 160^\circ$ до $T^\circ = 220^\circ$).

Таким образом, увеличение угла скалывания β_1 при увеличении подачи связано с повышением нормального контактного давления и температуры резания, приводящими к резкому снижению коэффициента трения на передней поверхности.

Изложенные выше соображения о коэффициенте трения и его изменчивости подтверждаются опытами по моделированию, проведенными на установке, аналогичной изложенному в [2]. На фиг. 7 представлен график изменчивости коэффициента трения пары ЦАМ4-1—ВК8 в зависимости от скорости



Фиг. 7. Влияние скорости скольжения на коэффициент трения пары «ЦАМ4-1—ВК8».

скольжения и удельного контактного давления, полученный на основании этих опытов.

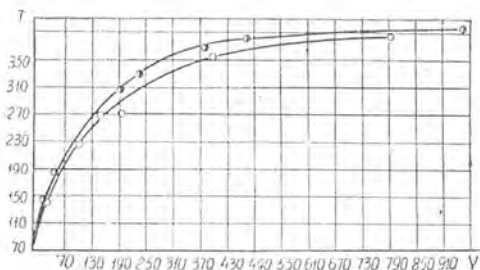
Из рассмотрения графика следует, что с увеличением скорости коэффициент трения сначала увеличивается, а затем уменьшается, стремясь к некоторой постоянной величине, зависящей от удельного контактного давления. Увеличение этого давления приводит к снижению коэффициента трения.

Что касается абсолютных величин коэффициента трения, то из графика фиг. 7 следует, что они сравнительно невелики, что подтверждает антифрикционные свойства сплава ЦАМ4-1. Однако полученные коэффициенты трения меньше таковых в процессе резания ввиду различия в условиях напряженно-деформированного состояния.

ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ

Исследование температуры резания проведено по методу естественной термопары «резец—изделие» (ВК-8—ЦАМ4-1).

Характер изменения температуры в зависимости от скорости резания, как это видно из фиг. 8, соответствует общепринятым представлениям. Обращает, однако, на себя внимание то, что при одинаковых условиях температура при свободном резании на 5—6% выше, чем при несвободном резании. Это несоответствие температур характеру процесса является следствием двух причин, одна из которых связана с несовершенством самого метода измерения температуры (осреднением), другая — с условиями теплоотдачи.



Фиг. 8. Зависимость температуры от скорости резания.

Материал ЦАМ 4-1; $t = 2$ мм; $s = 0.21$ мм/об; Резец ВК8; $\gamma = 16^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 20^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 0$. □ — свободное резание; ○ — несвободное резание.

При несвободном резании, кроме главной режущей кромки, в работе участвует и вспомогательная, что приводит к увеличению поверхности контакта резца с обрабатываемой заготовкой и стружкой. Это ведет к большему осреднению

ТЭДС и, следовательно, к уменьшению регистрируемой температуры.

С другой стороны, теплопроводность сплава ЦАМ4-1 почти в два раза выше, чем у твердого сплава ВК8 ($\lambda_{\text{ЦАМ4-1}} = 0,24$, $\lambda_{\text{ВК8}} = 0,14$), следовательно, отвод тепла в тело заготовки играет большую роль в общем балансе теплоты. Сечение теплоточа в тело заготовки при несвободном резании больше, чем при свободном, масса прилегающих к резову участков обрабатываемой заготовки при несвободном резании также больше, что приводит к увеличению скорости теплоотдачи за счет большого градиента температур. В результате возможно, что некоторое увеличение выделяющейся теплоты вследствие работы вспомогательной режущей кромки при несвободном резании будет перекрыто улучшением теплоотвода в изделие, что приведет к уменьшению температуры.

Графики зависимости температуры от подачи и глубины резания обнаруживают ту же тенденцию к стабилизации температуры, которая видна на фиг. 8. Это явление закономерно, если иметь в виду, что температура резания не может увеличиваться беспредельно, и должна наступить стабилизация при температурах, близких к температуре плавления обрабатываемого материала, тем более, что в нашем случае эта температура невелика (390°). С другой стороны, с повышением температуры теплопроводность металлов возрастает, а, следовательно, увеличивается теплоотвод в изделие, стружку и резец, что наряду с другими факторами, например, уменьшением коэффициента трения и связанной с ним работы, и приводит к уменьшению интенсивности нарастания температуры в зоне резания.

В соответствии со сказанным в формулах степенного вида показатели степени при элементах режима резания, вообще говоря, должны быть переменными. Однако учитывая практические трудности в использовании таких зависимостей, обычно используют формулы с постоянными показателями с указанием области режимов, в пределах которых они дают удовлетворительные результаты.

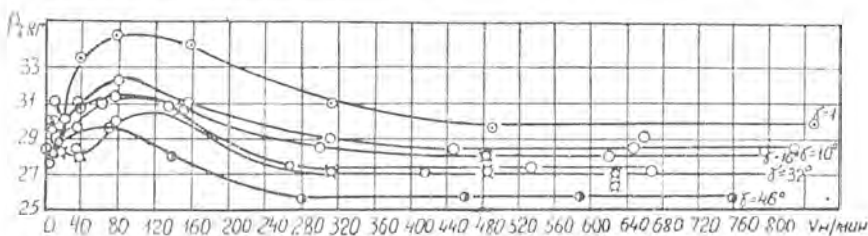
Таким образом, для несвободного резания нами получено:

$$\begin{aligned} \text{при } v < 400 \text{ м/мин } T^\circ &= 53 \cdot v^{0,35} \cdot s^{0,14} \cdot t^{0,03}; \\ \text{при } v \geq 400 \text{ м/мин } T^\circ &= 174,5 \cdot v^{0,13} \cdot s^{0,05} \cdot t^{0,01}. \end{aligned} \quad (7)$$

СИЛЫ РЕЗАНИЯ

В полном соответствии с изменением усадки стружки и коэффициента трения в зависимости от режимов резания и геометрии инструмента изменяются и силы резания.

На фиг. 9 представлена зависимость силы P_z от скорости резания. Как видно из фигуры, в области низких скоростей ($v < 20$ м/мин) силы резания изменяются незакономерно, что



Фиг. 9. Влияние скорости резания на силу P_z .

Материал ЦДМ4-1; $l=2$ мм; $s=0,21$ мм/об; Резец ВК8; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=20^\circ$; $\alpha=10^\circ$;
 $\lambda=0$; $r=0$.

связано, как уже отмечалось, с неустойчивым наростообразованием. С увеличением скорости резания выше 20 м/мин силы резания сначала возрастают, достигая максимума при $v=80-100$ м/мин, а затем падают, что связано с соответствующим изменением коэффициента трения. Увеличение скорости резания выше 480—490 м/мин не приводит к изменению сил резания. Последнее объясняется стабилизацией температуры резания и связанной с ней стабилизацией коэффициента трения для давлений, имеющих место в зоне резания.

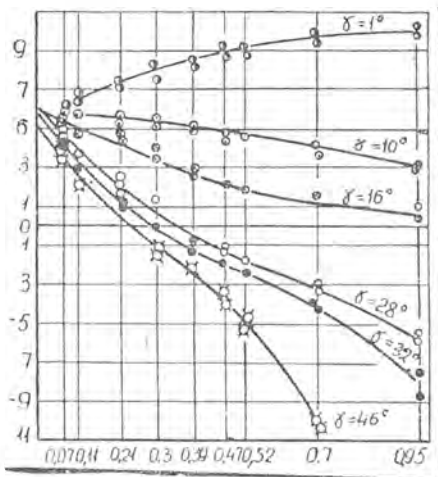
Аналогичные зависимости получены и для составляющих P_y и P_x .

Увеличение глубины резания вызывает непрерывное возрастание всех трех составляющих силы резания. Иначе обстоит дело с влиянием подачи.

С увеличением подачи во всем диапазоне скоростей до 2360 м/мин сила P_z возрастает, а составляющие P_y и P_x при значительных передних углах могут убывать и, как видно из фиг. 10, принимать отрицательные значения.

Из механики резания известно, что

$$P_x = P_N \cdot \sin \varphi \quad \text{и} \quad P_N = Q + N (\mu_1 \cdot \cos \gamma - \sin \gamma), \quad (8)$$



Фиг. 10. Влияние подачи на составляющую силы резания P_N .

Материал 11АМ4-1; $v = 287$ м/мин; $l = 2$ мм; Резец ВК8; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 20^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $r = 0$.

Следовательно, для того, чтобы P_N оставалась неизменной при увеличении подачи, необходимо уменьшение выражения $(\mu_1 - \text{tg } \gamma)$ пропорционально увеличению N . Выражение в скобках может уменьшаться за счет коэффициента трения μ_1 , что имеет место, как указывалось выше, при увеличении подачи в связи с увеличением нормального давления и температуры резания. Так, например, если воспользоваться зависимостями, вытекающими из наших исследований по углу скалывания, то при $\gamma = 16^\circ$ и $v = 287$ м/мин можно получить:

$s_{\text{мм/об}}$	0,07	0,11	0,21	0,3	0,39
μ_1	0,42	0,39	0,26	0,19	0,11

Если наступит момент, когда

$$\mu_1 = \text{tg } \gamma,$$

то в уравнении (8) выражение в скобках станет равным нулю и будет иметь место

где N — сила, нормальная к передней поверхности (сопротивление пластической деформации);

Q — сопротивление поверхностному внедрению резца в изделие и упругому восстановлению со стороны задней грани.

Так как сила Q почти не зависит от подачи, то P_N , а следовательно, и P_x будет оставаться неизменной при условии

$N (\mu_1 \cdot \cos \gamma - \sin \gamma) = \text{const}$
или

$$N (\mu_1 - \text{tg } \gamma) = \text{const.} \quad (9)$$

$$P_N = Q.$$

Для $\operatorname{tg} \gamma = 0,28$ ($\gamma = 16^\circ$) это условие наступит при $s \approx \approx 0,20$ мм/об.

При дальнейшем увеличении подачи и уменьшении коэффициента трения, когда

$$\mu_1 < \operatorname{tg} \gamma,$$

выражение в скобках в уравнении станет отрицательным и, следовательно, P_N будет уменьшаться с увеличением подачи.

Дальнейшее уменьшение коэффициента трения может привести к тому, что второе слагаемое в уравнении (8), имея отрицательное значение, по абсолютной величине станет равным первому слагаемому Q и тогда будет иметь место

$$P_N = 0 \text{ или } P_x = 0.$$

Как видно из фиг. 10, последнее условие для $\gamma = 16^\circ$ наступит при $s > 1$ мм/об.

Можно показать, что при увеличении переднего угла резца, несмотря на увеличение при этом коэффициента трения, все упомянутые выше условия наступают при меньших подачах. Так, например, из фиг. 10 видно, что для $\gamma = 32^\circ$ $P_x = 0$ при $s = 0,3$ мм/об. С дальнейшим увеличением подачи, P_x принимает отрицательное значение, т. е. меняет направление действия, втягивая резец в изделие.

ВЫВОДЫ

1. При обработке сплава ЦАМ4-1, как и других малопластичных металлов (силумин, титановые сплавы), имеет место «отрицательная» продольная усадка стружки.

2. Характер изменения силы P_z определяется характером изменения коэффициента внешнего трения.

3. Метод моделирования трения может быть использован для выяснения характера изменения коэффициента трения в зависимости от скорости и удельных контактных давлений. Однако этот метод дает заниженные значения коэффициентов трения по сравнению с таковыми в процессе резания.

4. В результате малых величин коэффициентов трения при обработке сплава ЦАМ4-1, силы P_x и P_y могут принимать отрицательные значения.

5. Значительное уменьшение коэффициентов трения при увеличении подачи объясняется не только повышением температуры резания, но и увеличением нормальных давлений на передней поверхности резца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. И. Резников, В. И. Ленилин. Производительная обработка цинкового сплава ЦАМ4-1. Куйбышев, 1962.
 2. Н. И. Резников и др. Производительная обработка нержавеющей и жаропрочных материалов. Машгиз, 1960.
-