

М. И. КЛУШИН

ОБОБЩЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕЖИМА РЕЗАНИЯ

Зависимость стойкости режущих инструментов T от элементов режима резания—скорости резания V , толщины среза a и ширины среза b —является весьма сложной по следующим двум причинам: во-первых, вследствие того, что каждая из трех функций— $T(V)$, $T(a)$, $T(b)$ —характеризуется немонотонностью, которая проявляется, когда аргумент удается варьировать в широких пределах, и, во-вторых, в связи с тем, что влияние каждого из элементов режима резания на стойкость существенно зависит (вплоть до изменения знака производной функции) от абсолютной величины других двух элементов. Широко распространенные степенные стойкостные формулы вида

$$T = \frac{C}{V^p \cdot a^q \cdot b^q} \quad (1)$$

получаются в результате кусочно-линейной аппроксимации охарактеризованной выше сложной зависимости и потому оказываются достаточно точными только в узком диапазоне изменения величин V , a , b .

Обобщенную стойкостную зависимость $T(V, a, b)$, учитывая практику ее применения, удобно рассмотреть, расчленив ее на две частные функции: зависимость стойкости от скорости $T(V)$ при постоянных элементах сечения среза a и b и зависимость скорости резания V_{Tc} от элементов сечения среза a и b при постоянной стойкости T_c .

1. Зависимость стойкости от скорости $T(V)$ при постоянном значении элементов сечения среза

На рис. 1 жирными линиями схематически показано несколько вариантов графического изображения в двойной логарифмической сетке зависимости $T(V)$, из тех, которые наблюдаются наиболее часто. Здесь линии D_1 и D_2 изображают ход зависимости в тех случаях, когда с уменьшением скорости стойкость стремится к какому-то конечному предельному значению, а линии $Ж_1$ и $Ж_2$, когда с изменением скорости резания возникает одно или несколько экстремальных значений стойкости.

Кривые типа D_1 и D_2 наблюдаются чаще при выполнении операций инструментами из быстрорежущих сталей, а $Ж_1$ и $Ж_2$ —твердо-

твердосплавными инструментами. Вообще же зависимость $T(V)$ является непериодической немонотонной функцией при обработке резанием, по-видимому, почти всех металлов любым из инструментальных режущих материалов с той, однако, особенностью, что если работа производится стальными инструментами, то практически имеем дело преимущественно с такими сечениями среза и скоростями резания, когда восстанавливаются лишь крайние правые ветви общей зависимости.

При уменьшении сечения среза (толщины среза) значения скоростей резания, при которых достигаются экстремальные значения стойкости, возрастают, кривая зависимости $T(V)$ сдвигается вправо, и ее различные участки проявляются все более полно, а переход от максимума стойкости к ее минимуму совершается все более круто, и разность ($T_{\max} - T_{\min}$) экстремальных значений стойкости увеличивается.

Обозначим стойкость, соответствующую положению первого справочного максимума на кривой $T(V)$ через $T_{\text{пр}}$ и будем называть ее предельной стойкостью (рис. 2).

Абсолютная величина $T_{\text{пр}}$ наиболее сильно зависит от свойств обрабатываемого материала. Так, при точении твердосплавными резцами серых чугунов типа СЧ 18-36 $T_{\text{пр}}$ приближается к 1500 мин; при точении машиноподелочных сталей колеблется в пределах 250—600 мин; при точении молибденового сплава ВМ1 составляет приблизительно 20 мин; при точении некоторых особенно труднообрабатываемых материалов и сплавов не превышает нескольких минут.

Весьма существенно влияние на $T_{\text{пр}}$ свойств инструментального режущего материала.

При обработке машиноподелочных сталей, как правило, значение $T_{\text{пр}}$ выше для инструментов быстрорежущих и ниже для инструментов твердосплавных; при обработке серых чугунов—наоборот. В то же время как при обработке машиноподелочных сталей, так и при обработке чугунов скорости резания, при которых достигается значение $T_{\text{пр}}$, при резании твердосплавными инструментами значительно превышают соответствующие скорости резания при резании инструментами быстрорежущими.

$T_{\text{пр}}$ существенно зависит также от свойств внешней среды, в которой осуществляется процесс резания. Путем изменения химического состава и способа использования смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) можно многократно изменять величину $T_{\text{пр}}$.

Влияет ли на $T_{\text{пр}}$ абсолютная величина элементов сечения среза—толщина и ширина? Большинство известных данных свидетельствует о том, что такое влияние имеется, причем с увеличением толщины и ширины среза значения $T_{\text{пр}}$ несколько возрастают. При обработке некоторых металлов и сплавов (например, молибденовых) влияние элементов сечения среза на $T_{\text{пр}}$ практически отсутствует.

Величина $T_{\text{пр}}$ сильно зависит от жесткости системы СПИД, с уменьшением которой она уменьшается.

В настоящее время еще не имеется исследований, достаточно полно раскрывающих связь между $T_{пр}$ и факторами, определяющими ее абсолютную величину. Ориентировочные значения $T_{пр}$, выявленные на основании наблюдений, проведенных в производственных условиях на автомобильных предприятиях страны, приводятся (по данным НИИТ Автопрома и ГАЗа) в табл. 1. Параллельно в этой же таблице приводятся значения T_{max} , меньшие, чем $T_{пр}$ для тех условий резания, в которых наблюдаются существенные колебания $T_{пр}$.

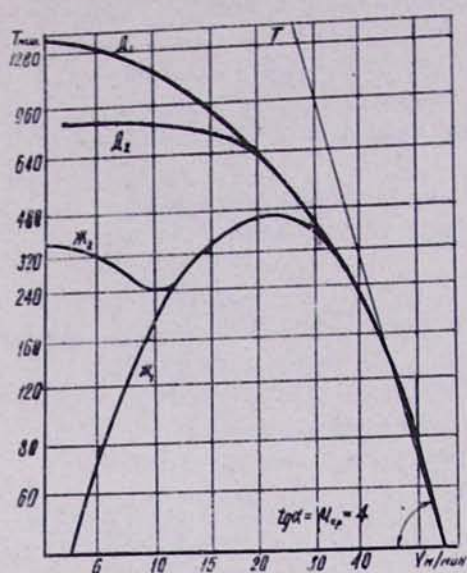


Рис. 1.

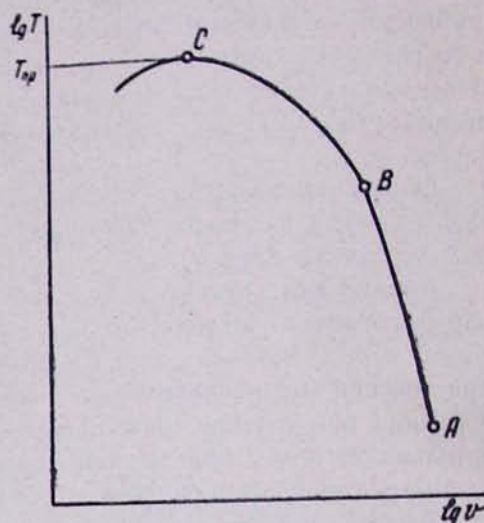


Рис. 2.

На рис. 2 схематически показана правая ветвь зависимости $T(V)$, т. е. тот ее участок ABC , который представляет наибольший интерес при расчете режима резания. Часть этого участка— AB —с достаточной точностью аппроксимируется зависимостью

$$T = \frac{C_T}{V^\mu}. \quad (2)$$

В уравнении (2) коэффициент C_T зависит от обрабатываемого и инструментального режущего материалов, вида инструмента и геометрических параметров его режущей части, размеров сечения среза и применяемой СОЖ. Показатель степени μ отражает интенсивность влияния скорости резания на стойкость инструмента на участке AB и зависит, хотя и не столь сильно, от тех же факторов, что и коэффициент C_T .

В условиях одноинструментальной обработки обычных машино-поделочных сталей (углеродистых и легированных) и чугунов опти-

малые значения периодов стойкости, как правило, находятся на участке *AB*, и применение зависимости (2) для расчета режима резания в этих условиях допустимо.

При многоинструментальной обработке применяемые скорости резания для многих инструментов падайки находятся на участке *BC* или

Таблица 1

Значения $T_{пр}$ и T_{max}

Инструмент	Инструментальный материал	Обрабатываемый материал	$T_{пр}$	T_{max}
Резцы	Быстрорежущая сталь	Сталь	1500	1500
		Чугун	1000	1000
		Алюминиевые сплавы	1500	1500
	Твердые сплавы	Сталь	600	300
		Чугун	1500	1000
		Алюминиевые сплавы	600	600
Сверла, зенкеры	Быстрорежущая сталь	Сталь	700	600
		Чугун	1500	1000
		Алюминиевые сплавы	700	700
	Твердые сплавы	Сталь	600	400
		Чугун	1000	1000
		Алюминиевые сплавы	600	600
Зенковки, цековки	Быстрорежущая сталь	Сталь	400	400
		Чугун	1000	1000
		Алюминиевые сплавы	—	—
	Твердые сплавы	Сталь	600	400
		Чугун	1000	1000
		Алюминиевые сплавы	—	—
Фрезы	Быстрорежущая сталь	Сталь	3000	1500
		Чугун	1500	1500
		Алюминиевые сплавы	—	—
	Твердые сплавы	Сталь	600	400
		Чугун серый	2000	1500
		Чугун ковкий	2000	1000

даже еще левее, в связи с чем расчет стойкости этих инструментов по формуле (2) приведет к ошибкам в десятки и сотни раз (для точки *C*). Поэтому для условий многоинструментальной обработки необходимо аппроксимировать кривую $T(V)$ иной математической зависимостью. К такому же требованию приходим и при определении режима резания в случаях обработки ряда жаропрочных сплавов, тугоплавких металлов и их сплавов, некоторых металлокерамических композиций, когда значения стойкости $T_{пр}$ невелики и приходится рассматривать весь участок *ABC*.

В целях математического описания хода зависимости «стойкость—скорость» в более широком диапазоне изменения скорости резания рядом авторов были предложены формулы, имеющие своей целью выразить эту зависимость во всем диапазоне изменения скорости резания или только на крайне правом ее участке—правее первого макси-

му стойкости. Среди последних наиболее удачной является структура формулы, предложенная Г. И. Темчиным,

$$T = \frac{C_r \cdot T_{пр}}{T_{пр} \cdot V^{\lambda} + C_r}. \quad (3)$$

Преимущества формулы (3) более четко проявляются, если ее переписать иначе, а именно

$$T = \frac{C_r}{V^{\lambda} + \frac{C_r}{T_{пр}}}.$$

Отсюда видно, что при относительно высоких значениях V первый член знаменателя будет очень велик, в связи с чем вторым членом можно пренебречь, и тогда мы имеем формулу (2); при уменьшении V первый член знаменателя быстро уменьшается и, когда V достаточно мала, стойкость T устремляется к значению $T_{пр}$.

2. Зависимость скорости резания от элементов сечения среза при условии сохранения постоянными значения стойкости режущего инструмента

Зависимости $T(a)$ и $T(b)$ в принципе имеют много общего с зависимостью $T(V)$, хотя и являются менее сильными. Их изолированное рассмотрение не представляется необходимым, поскольку оптимальное значение стойкости T_0 для каждой операции должно устанавливаться на основании анализа экономических и организационных факторов производства с учетом хода зависимости $T(V)$. Для расчета же оптимального значения скоростей резания V_0 требуется иметь зависимость $V_0(a, b)$. Последняя является условием сокращения постоянной стойкости режущего инструмента. Автором этих строк было в 1936 г.* высказано предположение, что условие постоянной стойкости удовлетворяется, если будет сохранен баланс между скоростью резания как фактором, обуславливающим интенсивность теплоподвода на единицу длины периметра активной части режущих кромок, и некоторой обобщенной характеристикой размеров и формы площади сечения среза как фактором, обуславливающим интенсивность отвода тепла от вершины режущего клина в точке O (рис. 3). Последняя получила название «характеристика резания»; численно она равна длине линии Od , опущенной с вершины треугольника O на линию, соединяющую концы отрезков l и l_1 .

Характеристика резания рассчитывается по формуле

$$X = \frac{l \cdot l_1 \cdot \sin \varepsilon}{l \cdot \sin \varepsilon_1 + l_1 \cdot \sin \varepsilon_2}. \quad (4)$$

* М. И. Клушин, Аналитический метод определения вида зависимости скорости резания от сечения стружки, Горький, 1936.

Здесь длины главного l и вспомогательного l_1 лезвий определяются по формулам

$$l = OA = \frac{t}{\sin \varphi}, \quad (5)$$

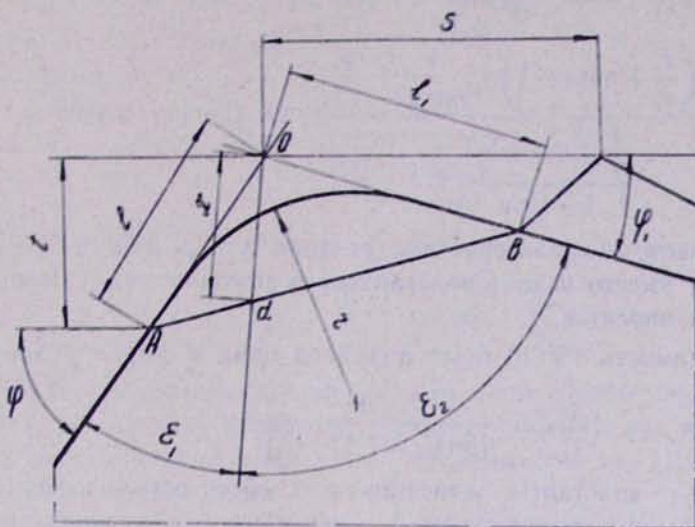


Рис. 3.

$$l_1 = OB = S \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_1)}. \quad (6)$$

Для определения углов ε_1 и ε_2 предложена система уравнений

$$\operatorname{ctg} \varepsilon_2 = \frac{200n + 1}{100n + 101} \operatorname{cosec} \varepsilon + \operatorname{ctg} \varepsilon, \quad (7)$$

где

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon;$$

$$n = \frac{l}{l_1}; \quad \varepsilon = 180 - \varphi - \varphi_1.$$

При наличии у резца переходной режущей кромки, оформленной в виде дуги окружности с радиусом r , в формулы (5–7) вносятся коррективы. При этом исходят из следующих соображений.

В точках переходной режущей кромки угол в плане φ не сохраняет постоянное значение. Введем в рассмотрение угол $\varphi_{\text{ср}}$, величину которого определим так, чтобы длина главной режущей кромки при $r = 0$, но с $\varphi = \varphi_{\text{ср}}$ равнялась действительной длине режу-

щей кромки с учетом ее прямолинейного и криволинейного участков при фактическом значении $r \neq 0$. Из этого условия получаются соотношения*

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\arccos\left(\frac{r-t}{r}\right)}{2} \quad \text{при } t < r(1 - \cos \varphi), \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\left(\frac{t}{r} + \cos \varphi - 1\right) \cdot \frac{1}{\sin \varphi} + \frac{\varphi}{2}}{\frac{t}{r} + \cos \varphi - 1 + 1} \quad \text{при } t > r(1 - \cos \varphi). \quad (9)$$

При расчете характеристики резания для резцов с $r \neq 0$ в формулах (5—7) вместо угла φ подставляется значение $\varphi_{\text{ср}}$. Корректив на угол φ_1 не вносится.

Зависимость $V_r(x)$ была получена нами в форме уравнения

$$V_r = \frac{A}{[\lg(C_1 X + 1) + C_2]^2}, \quad (10)$$

где C_1 и C_2 — константы, зависящие от свойств обрабатываемого и инструментального материалов; A — константа, зависящая от свойств обрабатываемого и инструментального материалов, а также от типа-размера режущего инструмента.

Зависимость $V_r(X)$ по формуле (10) в двойной логарифмической системе координат, за исключением участка, соответствующего малым значениям X , может быть аппроксимирована прямой линией, которой соответствует уравнение

$$V_0 = \frac{C_v}{X^k}. \quad (11)$$

Именно в этом последнем виде зависимость V_0 была принята институтом НИИТАвтопром при составлении нормативов по режимам резания для автомобильной промышленности.

3. Обобщенная стойкостная зависимость. Ее применение для расчета скорости резания

Обобщенная зависимость стойкости резцов от элементов режима резания, применяемая в достаточно широком диапазоне изменения последних, получается в результате объединения формул (3) и (11)

$$T = \frac{C_r \cdot C_v^k}{V^n \cdot X^{k_p} + \frac{C_r}{T_{\text{пр}}} C_v^k}. \quad (12)$$

* Эти соотношения получены Ю. А. Розенбергом.

В формуле (12) значение C_T справедливо для какого-то определенного значения величины $X=X_c$, а значение C_v — для какого-то определенного значения величины $T=T_c$. При условии, что $T=T_c$, можно написать:

$$T_c = \frac{C_T \cdot C_v^2}{V_{T_c}^2 \cdot X^{k_p} + \frac{C_T \cdot C_v^2}{T_{пр}}}$$

откуда

$$C_T = \frac{T_c \cdot V_{T_c}^2 \cdot X^{k_p}}{C_v^2 \left(1 - \frac{T_c}{T_{пр}}\right)}$$

Учитывая это, получаем

$$T = \frac{C_v}{\left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{пр}}\right) X^{k_p} V^2 + \frac{C_v^2}{T_{пр}}} \quad (13)$$

Цель расчета режима резания состоит в том, чтобы определить такие численные значения элементов режима (a, b, V), при которых тот или иной экономический показатель производства на данной операции становится оптимальным.

Оптимизации могут подлежать: производительность металлорежущего станка, расходы по инструменту, себестоимость операции и т. п.

Абсолютная величина перечисленных экономических показателей определяется, соответственно, по формулам

$$Q = \frac{1}{t_m \left(1 + \frac{\tau}{T}\right) + t_n}, \quad (14)$$

$$S = \left(\frac{A_{ин}}{P_{\tau 1}} + A_{зат} + A_{нал}\right) \frac{t_m}{T}, \quad (15)$$

$$C_{пер} = t_m E \left(1 + \frac{\tau}{T}\right) + S. \quad (16)$$

В этих формулах:

Q — производительность станка, измеренная количеством обработанных деталей в единицу времени;

S — стоимость в копейках расходов по инструменту, отнесенная на одну обработанную деталь;

$C_{пер}$ — переменная, т. е. зависящая от режима резания часть себестоимости операции в копейках;

t_m — машинное время операции в минутах;

t_n — вспомогательное время операции в минутах;

T — стойкость режущего инструмента в минутах машинного времени (но не в минутах фактического резания);

τ —время в минутах простоя станка, связанное с заменой затупившегося инструмента;

$A_{\text{ин}}$ —стоимость нового инструмента в копейках;

$A_{\text{зат}}$ и $A_{\text{нал}}$ —затраты, связанные с одной переточкой и наладкой инструмента в копейках;

P —число переточек инструмента;

E —себестоимость станкоминуты в копейках.

Уравнения (14—16) являются целевыми функциями в неразвернутом виде, поскольку их связь с элементами режима резания остается нераскрытой.

Целевые функции в развернутом виде получаются после того, как машинное время и стойкость инструмента будут выражены через элементы режима резания.

Проделав это с использованием известных соотношений для определения машинного времени и формулы (13) и проведя анализ экстремальных значений получающихся функций, приходим к следующим выводам.

а. Максимальная производительность металлорежущего станка, минимальные расходы по инструменту и минимальная себестоимость операции достигаются при условии, что режимы резания обеспечивают стойкости режущего инструмента, определяемые следующими формулами, соответственно:

$$T_{Q-\max} = \frac{(p-1)\tau \cdot \lambda}{T_{\text{пр}} + \tau p \cdot \lambda} \cdot T_{\text{пр}}; \quad (17)$$

$$T_{S-\min} = \frac{p-1}{p} \cdot T_{\text{пр}}; \quad (18)$$

$$T_{\text{с пер}-\min} = \frac{(p-1)\left(\tau + \frac{S}{E}\right) \cdot \lambda}{T_{\text{пр}} + p\left(\tau + \frac{S}{E}\right) \cdot \lambda} \cdot T_{\text{пр}}; \quad (19)$$

где λ —отношение времени резания к машинному времени.

б. При удовлетворении каждого из условий (17—19) абсолютные оптимумы соответствующей функции будут наиболее выгодными, если элементы режима резания устанавливаются в следующей последовательности: в первую очередь максимально возможной назначается ширина среза (предполагается, что $b > a$), затем также максимально возможной—толщина среза, а скорость резания рассчитывается так, чтобы удовлетворить одному из условий (17—19).

Расчет скорости резания осуществляется по формуле

$$V_{\text{то}} = \frac{C_v}{X^k} \cdot \left| \frac{(T_{\text{пр}} - T) \cdot T_{\text{с}}}{(T_{\text{пр}} - T_{\text{с}})T_0} \right|^{1/p}, \quad (20)$$

где T_s — значение стойкости, соответствующее максимуму оптимизируемой функции;

T_c — постоянное значение стойкости, применительно к которому определено численное значение константы C_v .

Приведенные зависимости применимы не только для проходных резцов, но и для большинства других видов режущих инструментов и методов обработки резанием. Существенно различными являются только соотношения для расчета характеристики резания в зависимости от технологических параметров сечения среза.

Дальнейшее усовершенствование зависимостей (13) и (20) может быть достигнуто путем уточнения значений $T_{пр}$ для многообразных условий резания, а также установления зависимости $T_{пр}(x)$.

4. Обобщение понятий о ширине и толщине среза

Среди факторов, которые могут ограничивать верхний предел численных значений элементов режима резания, первое место занимают ограничения по предельно допустимой величине какой-либо из проекций равнодействующей силы резания или по предельно допустимой мощности, требуемой для резания. Это обуславливает необходимость проведения соответствующих расчетов.

Зависимость силы p (имеется в виду любая из проекций равнодействующей силы резания) от толщины среза « a » и ширины среза « b » выражается эмпирическими формулами вида

$$p = C_p b^{x_p} \cdot a^{y_p}. \quad (21)$$

Для возможности использования формул как вида (21) в достаточно широком диапазоне изменения размеров элементов сечения среза решающее значение имеет правильное определение для каждого из методов обработки резанием толщины среза « a » и ширины среза « b » в зависимости от технологических параметров сечения среза (подачи, глубины резания, ширины фрезерования и др.).

Понятия «толщина среза» и «ширина среза» представляют определенный реальный смысл только для условий свободного прямоугольного резания, так как только в этом случае сечение среза является правильным прямоугольником, и направление схода стружки по передней поверхности инструмента всегда перпендикулярно единственному режущему лезвию. При осуществлении иных методов обработки резанием сечение среза практически всегда более или менее отличается от прямоугольника, а направление схода стружки отклоняется от перпендикуляра к любому из режущих лезвий. Поэтому понятия толщины и ширины среза во всех этих случаях теряют определенность. Сохраняя их, тем не менее, для любого из процессов резания мы тем самым как бы заменяем реальный процесс несвободного резания эквивалентным ему по системе сил, но фиктивным процессом свободного прямоугольного резания. Это имеет большой практический и принципиальный

ный смысл, но весь вопрос состоит в том, чтобы установить, какими соотношениями при этом следует пользоваться.

Как можно получить такие соотношения, покажем на примере продольного точения.

В общем случае равнодействующая сил, которая действует на переднюю поверхность инструмента, лежит в плоскости стружкообразования. Последняя определяется тем, что она проходит через вектор скорости резания (движение инструмента относительно детали) и вектор скорости стружки (движение стружки относительно инструмента). В плоскости стружкообразования лежит также вектор скорости сдвига (движение стружки относительно обрабатываемой детали), в этой же плоскости следует определять действительную геометрию режущего инструмента и измерять толщину сечения среза.

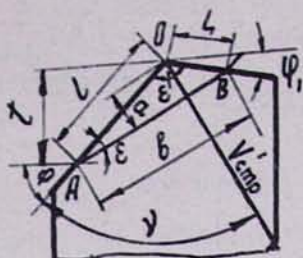


Рис. 4.

На рис. 4 показана проекция двухкромочного проходного резца на основную плоскость. Здесь $V_{\text{стр}}$ — проекция вектора скорости стружки на основную плоскость; ее направление совпадает с линией пересечения основной плоскости и плоскости стружкообразования; γ — угол между плоскостью стружкообразования и главной плоскостью резания; $AO=l$ — проекция главной режущей кромки; $OB=l_1$ — проекция вспомогательной кромки.

При условии, что $l_1=0$, направление схода стружки было бы перпендикулярно лезвию l ; при условии, что $l=0$ — перпендикулярно лезвию l_1 . При $l \neq 0$ и $l_1 \neq 0$ направление схода стружки будет промежуточным.

Условимся, что импульс, получаемый стружкой при ее движении по передней поверхности от частиц, отделяемых лезвием, AO изображается вектором $\bar{T}$ (рис. 5), который пропорционален лезвию AO и перпендикулярен ему. Примем также, что вектор $\bar{l}_1$, пропорциональный лезвию OB и перпендикулярный ему, изображает импульс, получаемый стружкой от частиц, отделяемых этим вторым лезвием. При таких допущениях вектор $\bar{q}$, равный сумме векторов $\bar{T}$ и $\bar{l}_1$, будет определять направление движения стружки по передней поверхности инструмента. Из самого построения вытекает, что вектор $\bar{q}$ расположен перпендикулярно линии AB . Следовательно, направление схода стружки можно определить геометрически.

Положение вектора $\bar{q}$ известно, если известны углы ε' и ε'' . Определим их.

С учетом того, что

$$n = \frac{l}{l_1} \quad (22)$$

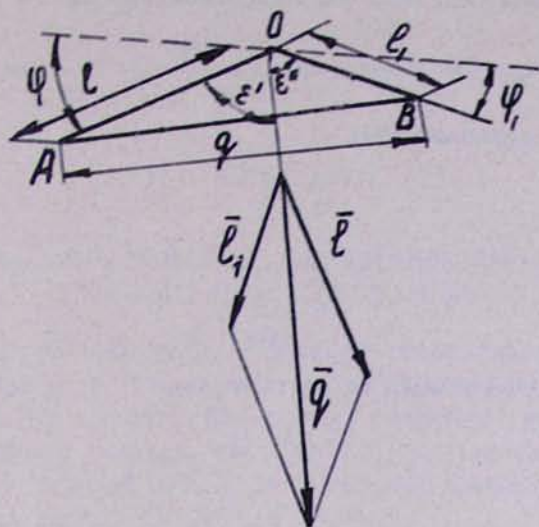


Рис. 5

можно показать, что

$$\sin \varepsilon' = \frac{n - \cos \varepsilon}{\sqrt{n^2 + 1 - 2n \cos \varepsilon}} \quad (23)$$

$$\sin \varepsilon'' = \frac{1 - n \cos \varepsilon}{\sqrt{n^2 - 1 - 2n \cos \varepsilon}}. \quad (24)$$

Введем новую функцию Θ , согласно уравнению

$$\Theta = \frac{1}{\sin \varepsilon' + \frac{1}{n} \sin \varepsilon''} = \sqrt{\frac{n^2}{n^2 + 1 - 2n \cos \varepsilon}}. \quad (25)$$

Тогда окончательно можно написать:

$$\sin \varepsilon' = \Theta \left(\frac{n - \cos \varepsilon}{n} \right) \quad (26)$$

$$\sin \varepsilon'' = \Theta \left(\frac{1 - n \cos \varepsilon}{n} \right). \quad (27)$$

Теперь, зная направление схода стружки при любом сечении среза, мы знаем и плоскость, в которой измеряется толщина среза. Одновременно становится известной плоскость, в которой должна измеряться ширина среза, поскольку ширина—размер, перпендикулярный толщине. Из изложенного вытекает, что шириной среза при несвободном резании в условиях продольного точения резцов с углом наклона режущей кромки $\lambda = 0$ является линия $q = AB$, поскольку она перпендику-

лярна направлению схода стружки и одновременно представляет собой ширину основания стружки. На этом основании имеем

$$b = q = AB = l \sin \varepsilon' + l_1 \sin \varepsilon'' = l \left(\sin \varepsilon' + \frac{1}{n} \sin \varepsilon'' \right).$$

Или, с учетом уравнения (25),

$$b = \frac{l}{\Theta}, \quad (28)$$

т. е.

$$b = \frac{t}{\sin \varphi \cdot \Theta}. \quad (29)$$

Толщина среза вычислится из соотношения

$$ab = ts_s,$$

откуда

$$a = s \cdot \sin \varphi \cdot \Theta. \quad (30)$$

Если проходной резец имеет переходную режущую кромку, оформленную как участок дуги окружности радиуса r , то при вычислении величин n , Θ , b и a вместо угла φ должен фигурировать угол $\varphi_{\text{ср}}$, определяемый по уравнениям (8) и (9).

Согласно уравнениям (28), (30) и (25), при несвободном резании на ширину среза влияет не только размер активного участка главного лезвия, но и вспомогательного лезвия; соответственно толщина среза зависит не только от размера активного участка вспомогательного лезвия, но и главного лезвия. При равенстве активных участков главного и вспомогательного лезвий их влияние на ширину и толщину среза одинаково. Влияние каждого из лезвий на толщину и ширину среза определяется размером лезвия и функцией Θ .

Приведенные формулы в различных модификациях, разработанных применительно к многочисленным видам режущих инструментов, обрабатываемых и инструментальных материалов, используются для расчета режимов резания с помощью ЭВМ Горьковским НИИ прикладной математики и кибернетики, Институтом кибернетики АН БССР и другими организациями.