Инженер ЛАММ М. М.

Основы гидродинамической теории резания металлов (теоретическая часть)

Вывод теоретической зависимости между давлением резания и основными параметрами резания

Для данной „геометрии“ резца сопротивление резанию зависит от взятых режимов резания, характеризуемых: скоростью резания v, глубиной резания h и подачей s. Поэтому, давление резания в первую очередь будет функцией этих перечисленных выше аргументов. Далее, давление резания должно зависеть от рода обрабатываемого материала, точнее говоря, от физических свойств этого материала. Таковыми физическими свойствами могли бы быть: плотность, вязкость, теплоемкость, теплопроводность, электро- и магнитопроводность и т. д. Однако, нас могут интересовать не вообще физические свойства материала, а лишь те из них, которые могут влиять на процесс его обработки резанием. Более того, нам будет достаточно уловить лишь только главные физические свойства металла, оказывающие влияние на процесс резания. При отыскании этих главных факторов ничем иным нельзя руководствоваться, кроме известного рода „физического чутья“, подкрепленного опытом. Так как по своей сути давление резания есть понятие механического порядка, то и факторы, влияющие на изменение давления резания, должны входить в нашу функцию как механические величины. Поэтому, оставляя в нашей зависимости плотность обрабатываемого материала ρ и вязкость его μ, мы отбрасываем теплоемкость c и теплопроводность r, очевидно, оказывающие лишь влияние (и в весьма большой степени) на стойкость режущей поверхности инструментов.

Итак, наша функциональная зависимость напишется следующим образом:

$$P = f(v,\ \mu,\ \rho,\ h,\ s). \tag{1}$$

Для того, чтобы хотя бы частично разрешить эту зависимость, воспользуемся методом анализа размерностей.

Всегда функцию, согласно уравнению (1), можно представить в виде произведения ее аргументов в каких-то произвольных степенях, т. е.

$$P = \text{const}\, v^a \mu^b \rho^c h^d s^e. \tag{2}$$

Любая физическая величина имеет свою размерность (или формулу размерности), выраженную в основных единицах измерения. Таковыми основными единицами измерений у нас будут: масса M, длина L, время T.

Выпишем формулу размерности для каждого аргумента нашей функции.

Сопротивление резанию	P	Размерность	MLT^{-2}
Скорость	v	„	LT^{-1}
Вязкость	μ	„	$ML^{-1}T^{-1}$
Плотность	ρ	„	ML^{-3}
Глубина резания	h	„	L^1
Подача	s	„	L^1

После подстановки в уравнение (2) размерности каждого аргумента будем иметь:

$$MLT^{-2} = L^a T^{-a} \cdot M^b L^{-b} T^{-b} \cdot M^c L^{-3c} L^d L^e. \tag{3}$$

Отсюда имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} b + c &= 1 \text{ для } M \\ a - b - 3c + d + e &= 1 \quad \text{„} \quad L \\ -a - b &= -2 \quad \text{„} \quad T. \end{aligned}$$

Решая эту систему уравнений относительно произвольных показателей степени b и e, получим: $a = 2 - b$; $c = 1 - b$; $d = 2 - b - e$. После соответствующей подстановки и простого преобразования уравнение (2) примет следующий вид:

$$P = \text{const}\, \rho h^2 v^2 \left(\frac{\mu}{\rho v h}\right)^b \left(\frac{s}{h}\right)^e. \tag{4}$$

Уравнение (4) может быть преобразовано следующим образом: вместо квадрата глубины резания мы можем поставить сечение снимаемой стружки F, ввиду того что размерность при этом остается прежняя. Такая подмена окажет влияние только на величину постоянного const. Отношение глубины резания h к подаче s есть ни что иное, как удлинение стружки, обозначаемое нами символом λ. Безразмерный же коэфициент в произвольной степени „b“ есть $1/R_c$, где R_c — так называемое в гидродинамике число Рейнольдса, характеризующее собою вид потока жидкости.

После подобных преобразований наша формула (4) напишется:

$$P = \text{const}\, \rho v^2 F \left(\frac{1}{R_c}\right)^b \cdot (\lambda)^k, \tag{5}$$

а, ввиду того что значение показателей степени b и k ничем не ограничены,

$$P = \text{const}\, \rho v^2 F f(R_c, \lambda). \tag{6}$$

Давление резания любого обрабатываемого материала равно некоторому постоянному const, умноженному на произведение из плотности, квадрата скорости и сечения снимаемой стружки, и является функцией числа Рейнольдса R_c и удлинения стружки λ.

Ввиду того что размерность произведения из плотности обрабатываемого материала на квадрат скорости резания равна размерности удельного давления резания, мы можем написать, что:

$$P = \text{const}\, p F f(\lambda, R_c), \tag{7}$$

т. е. полное давление резания прямо пропорционально какой-то постоянной const, — зависящей от вида обрабатываемого материала, — сечению снимаемой стружки и является функцией числа Рейнольдса и удлинения стружки λ.

Так как величины, входящие в нераскрытую функцию уравнения (7), имеют нулевую размерность, то всю эту функцию мы можем обозначить некоторым коэфициентом c_x, называемым коэфициентом лобового сопротивления.

Для любой иной формы режущей поверхности коэфициент лобового сопротивления был бы несколько иным, следовательно, общее выражение коэфициента лобового сопротивления c_x будет:

$$c_x = f(\lambda, R_c, \Phi),$$

где символ Φ означает влияние геометрической формы резца или короче — его „геометрию“, и наше уравнение (7) перепишется следующим образом:

$$P = c_x \rho F v^2 \tag{8}$$

$$P = c_x p F. \tag{8'}$$

Выражение $\frac{1}{2}\rho F v^2$ есть ни что иное как скоростной напор, а поэтому мы можем сказать, что: **давление резания есть часть скоростного напора.**

Нам могут привести единственное возражение, а именно, что один из аргументов — скорость резания — в нашей зависимости лишний. Так, Тэйлор считал, что давление резания от скорости резания не зависит. До сих пор многие специалисты в области обработки металлов резанием также считают, что для практических режимов резания таковой зависимости не существует. Предположим, что мы с этим согласились.

В таком случае общий вид нашей зависимости будет:

$$P = f(\mu, \rho, h, s). \tag{9}$$

Аналогично предыдущему:

$$P = \text{const}\, \mu^a \rho^b h^c s^d.$$

После подстановки размерности каждого из аргументов и разрешения системы полученных в результате такой подстановки уравнений относительно произвольного показателя d, будем иметь:

$$P = \text{const}\, \frac{\mu^2}{\rho} f(\lambda). \tag{10}$$

Умножим и разделим правую часть уравнения (10) на произведение $\rho v^2 F$

$$P = \text{const}\, \frac{\mu^2}{\rho} \frac{\rho v^2 F}{\rho v^2 F} f(\lambda) = \text{const} \left(\frac{\mu}{\rho v \sqrt{F}}\right)^2 \rho F v^2 f(\lambda) = \text{const}\, \rho F v^2 R_c^{-2} f(\lambda).$$

Для геометрически подобных сечений стружки $f(\lambda) = \text{const}$ и, следовательно,

$$P = \text{const}\, \rho F v^2 (R_c)^{-2} = c_x \rho F v^2.$$

Следовательно, если бы даже давление резания и не зависело от скорости резания, все же мы могли бы сказать, что в этом случае давление резания обратно пропорционально квадрату числа Рейнольдса. Но так как давление резания все же зависит от скорости резания (что доказывают современные опыты), то мы можем сказать, что степенной показатель числа Рейнольдса меньше минус второй степени. Поэтому формула (10) есть частный случай формулы (6).

По поводу коэфициента сопротивления какого либо тела в жидкой среде, Прандтль пишет: „Придерживаясь чисто формального квадратичного закона сопротивления мы вкладываем всю сложность различного рода проявлений действия внутреннего трения в функциональную зависимость коэфициента сопротивления от числа Рейнольдса“ (Прандтль и Титьенс „Гидро- и аэромеханика“, стр. 112).

На основании уравнения (6) мы можем сказать, что удельное давление резания зависит не только от удлинения λ, но и от числа Рейнольдса, а следовательно, — косвенным путем, — от величины поперечного сечения снимаемой стружки. Наши эксперименты с хромоникелевой и далее машиноподелочной сталью не обнаружили зависимости между удельным давлением резания p и сечением снимаемой стружки. Это может доказывать лишь то, что в пределах практических режимов резания влияние изменения числа Рейнольдса и изменение самого числа Рейнольдса очень мало. Во всяком случае, очевидно, влияние изменения числа Рейнольдса не выходило за пределы наших возможных относительных ошибок измерения. Возможно, при более значительном увеличении сечения снимаемой стружки, чем это было нами проведено $\left(\frac{F}{F_1} = 13{,}8\right)$, влияние изменения F было бы уловлено. Однако, можно сказать с достаточной уверенностью, что практически таким влиянием F на удельное давление резания p можно пренебречь. Действительно, на основании формулы (6) можно сказать, что изменение удельного давления p от скорости резания v происходит постольку, поскольку изменяется число Рейнольдса $R_c = \frac{\rho v \sqrt{F}}{\mu}$, которое прямо пропорционально v и корню квадратному из сечения стружки F.

Поэтому, если мы пренебрегаем влиянием скорости резания на удельное давление резания p, то тем более можем пренебречь влиянием сечения стружки F.

При более или менее значительном изменении скорости резания v влияние числа Рейнольдса будет сказываться сильно.

В функции

$$R_c = \text{const}\left(\frac{\rho v \sqrt{F}}{\mu}\right) = \text{const}\left(\frac{\rho}{\mu}\right) \cdot (v \sqrt{F})$$

имеем две независимые переменные v и F и две зависимые ρ и μ. Поэтому постоянный для всех видов обрабатываемого материала показатель степени b в уравнении (5) должен обязательно стать переменным, как только мы станем считать ρ и μ аргументами независимыми.

Иными словами, мы можем считать число Рейнольдса как бы независящим от изменения плотности и вязкости обрабатываемого материала, но в таком случае даже для одного и того же материала показатель степени b в уравнении (5) не является величиной постоянной; меняется не только абсолютная величина числа Рейнольдса, но и показатель его степени.

Отсюда вытекает большая трудность в отыскании экспериментальной зависимости.

Трудность получения указанной зависимости усугубляется еще одним обстоятельством, а именно наростообразованием на режущей поверхности инструмента. Образование нароста в процессе резания металлов оказывает очень большое влияние как на величину давления резания (вследствие ухудшенной поверхности обтекания и поэтому увеличения коэфициента лобового сопротивления c_x), так и на стойкость режущего инструмента. Влияние наростообразования на давление резания P и на период резания T мы разберем более подробно далее, после вывода аналитической зависимости периода резания от его основных параметров.

* * *

Дадим еще сравнение нашей теоретической зависимости с имеющимися экспериментальными. Теория резания металлов дает два вида экспериментальных формул давления резания:

1) $P = \text{cons}\; h^x s^y$ или же $P = f(h, s)$ (Рус.-амер. школа рез.);

2) $P = \text{const}\, F^x$ или же $P = f(F)$ (Немецкая школа рез.).

Нетрудно доказать, что наша зависимость $P = f(F, \lambda, R_c)$, удовлетворяя обоим видам указанных выше зависимостей, одновременно дополняет их.

Для данного обрабатываемого материала удельное д вление резания p в уравнении (7) является величиной постоянной $p = \text{const}$, следовательно, уравнение (7) может иметь следующий вид:

$$P = \text{const}\, F\,(\lambda)^a (R_c)^b.$$

Напишем это уравнение в развернутом виде:

$$P = \text{const}\, h \cdot s \left(\frac{h}{s}\right)^a \left(\frac{1}{\sqrt{F}}\right)^b \left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^b.$$

После соответствующих преобразований можем переписать это уравнение так:

$$P = \text{const}\, h^{1+\left(a-\frac{b}{2}\right)} s^{1-\left(a+\frac{b}{2}\right)} \left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^b, \qquad (11)$$

т. е. мы привели нашу зависимость к виду:

$$P = \text{const}\, h^x s^y \left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^b. \tag{12}$$

Легко показать, что наша теоретическая зависимость так же просто может быть преобразована к виду:

$$P = \text{const}\, F^{\left(1 - \frac{b}{2}\right)} f(\lambda) \left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^b. \tag{13}$$

Если показатели степени a и b положительны и меньше единицы, то всегда в уравнении (12) $x > y$.

Из вывода формулы (5) или (6) видно, что степенные показатели удлинения λ и числа Рейнольдса R_c являются величинами постоянными для любого обрабатываемого материала и любой формы режущей поверхности инструмента. Отсюда следует, что если мы будем выражать нашу зависимость без учета влияния выражения $\left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^b$ на давление резания, то показатели степени a и b для разных обрабатываемых материалов должны быть разными. Более того, эти степенные коэфициенты будут величинами переменными для одного и того же материала, но при различных значениях скорости резания.

Если мы по опытным данным Челюскина, относящимся к различного рода обрабатываемого материала, возьмем значение показателя степени a равным $^1/_8$, а по данным гидромеханики — показатель степени числа Рейнольдса для ламинарного потока принять равным в пределах $^1/_4$—$^1/_5$, то наша формула (12) примет следующий вид:

$$P = \text{const}\, hs^{0,75} \left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^{0,25}.$$

Здесь постоянная величина const зависит от рода обрабатываемого материала, показатель же степени при подаче $y = 0,75$ одинаков для всех материалов. Если же не учитывать влияния выражения $\left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^{0,25}$, то этот показатель степени для данного диапазона скоростей будет в незначительной степени колебаться в ту или иную сторону.

При такой же подстановке формула (13) перепишется:

$$P = \text{const}\, F^{0,875} (\lambda)^{0,125} \left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^{0,25}.$$

Приведем несколько примеров величины степенных показателей из литературных данных.

По Челюскину для различного рода обрабатываемого материала степенные показатели при глубине резания h и подаче s следующие:

$$x = 1, \quad y = 0,73 - 0,78.$$

Наши исследования по хромоникелевой стали в лаборатории резания Харьковского Авиаинститута давали величину этих показателей степеней:

$$x = 0,9; \quad y = 0,75.$$

По данным Клопштока, Кроненберга *AWF* показатель корня зависимости $P = \text{const}\, F^b$ для разных обрабатываемых материалов колеблется в пределах

$$b = 0,75 - 0,865.$$

* * *

В заключение разберем режим резания, при котором мы работаем с подачей, превышающей глубину резания, т. е.

$$s > h.$$

Случай этот, не встречающийся на практике, может иметь чисто теоретический интерес в такой постановке вопроса: являются ли показатели степени при глубине резания и подаче постоянными величинами для данного обрабатываемого материала и данной „геометрии“ режущей поверхности?

Вспомним, что мы в гидромеханике понимаем под удлинением λ.

Если поместить прямоугольную плоскую пластину в потоке какой-либо жидкости с данными размерами t и l, то удлинением пластины называется отношение ее бо́льшего линейного размера к меньшему, т. е.

$$\lambda=\frac{l}{t} \text{ при } l>t \text{ или } \lambda=\frac{t}{l} \text{ при } l<t.$$

Следовательно, применительно к разбираемому нами случаю, удлинением стружки нужно считать отношение подачи к глубине резания $\lambda=\frac{s}{h}$, и наше уравнение (6) в развернутом виде напишется так:

$$P=\text{const}\, hs\left(\frac{s}{h}\right)^a\left(\frac{1}{\sqrt{F}}\right)^b\left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^b$$

или, после соответствующих преобразований:

$$P=\text{const}\, h^{1-\left(a+\frac{b}{2}\right)}\, s^{1+\left(a-\frac{b}{2}\right)}\left(\frac{\mu}{\rho v}\right)^b. \tag{14}$$

Как видим, уравнение (14) разнится от уравнения (11) только тем, что степенные показатели при глубине резания h и подаче s поменялись своими местами. Это явление, известное в теории резания металлов как явление „обратной стружки“, подтверждается экспериментально (Челюскин).

Таким образом, существующие экспериментальные формулы являются лишь частным случаем выведенной нами аналитической зависимости:

$$P=f(F,\ \lambda,\ R_c).$$

ВЫВОД ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ СТОЙКОСТЬЮ РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ОСНОВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕЗАНИЯ

До сих пор теория резания металлов не дает аналитической зависимости между стойкостью режущего лезвия инструмента и основными параметрами резания. Между тем, получение таковой зависимости было бы чрезвычайно ценным и желательным, ибо в этом случае мы не только могли бы хорошо понять явление затупления режущей поверхности, но и наметить ряд мероприятий, позволяющих увеличить период резания инструмента. Нами получены лишь опытные зависимости (связывающие стойкость режущих поверхностей инструмента T с сечением снимаемой стружки F, с глубиной резания h и подачей s), общий вид которых следующий:

$$T=\frac{\text{const}}{F^a};\ T=\frac{\text{const}}{h^a s^b}.$$

Такие же опытные зависимости даются между стойкостью T и скоростью резания v (закон „$T-v$“). Общий вид этих зависимостей, как известно, следующий:

$$T_1=\text{const}\, T\left(\frac{v}{v_1}\right)^a,$$

где показатель степени a и постоянный коэфициент разные, в зависимости от обрабатываемого материала и материала резца. Правильнее было бы сказать, что const и показатель степени a изменяются в зависимости от **наименования обрабатываемого материала, а не от физических или механических свойств и качеств этого материала.** Именно вследствие того, что износ режущей поверхности инструмента мы не связываем с физическими свойствами обрабатываемого материала, наша опытная зависимость „$T - v$“ может привести к абсурдным результатам, стоит только выйти из тех пределов, в каких этот закон „$T - v$“ был получен экспериментально.

Так например, известно, что при дальнейшем увеличении скорости резания в очень больших пределах, стойкость не только продолжает падать в прежней степенной зависимости, но даже начинает в известных пределах повышаться. Отсюда совершенно очевидно, что нами не учтены еще какие-то факторы, влияющие на износ режущей поверхности, несмотря на то, что остальные параметры резания, как например, глубина h и подача s, геометрия резца и т. д. остаются постоянными.

Точно так же, вследствие чистого эмпиризма, у разных исследователей получаются при одном и том же основном виде зависимости $T = \frac{\text{const}}{h^a s^b}$ различные показатели a и b, даже для одного и того же обрабатываемого материала. Значительные расхождения могут получаться даже при классификации режимов резания на черновые, получистовые и чистовые.

Прежде чем приступить к отысканию аналитической зависимости между стойкостью режущей поверхности и основными параметрами резания, а также основными физическими свойствами обрабатываемого материала и резца,— следует разобраться, в чем заключается сущность износа режущей поверхности.

Виды износа режущей поверхности инструмента

Рассмотрим токарный резец в работе и выясним, вследствие каких причин его режущая поверхность (или режущая грань) может затупиться или выйти из строя. Прежде всего, при некоторых режимах резания режущее лезвие резца может выкрашиваться. Это происходит или в результате случайных толчков и ударов вследствие того, что режущее лезвие попало на твердое включение обрабатываемого материала, на раковину, или же, в некоторых случаях, вследствие взятых режимов резания. Допустим, при определенно взятой скорости резания и увеличенных глубине резания и подаче может получиться стружка скалывания или даже надлома. В этом случае мы не получаем сплошного потока металла, пришедшего в состояние текучести. Образно выражаясь, мы имеем как бы „ледоход“. В общем потоке плавают и раскалываются льдины. Эти отдельные элементы металла, не пришедшего в пластическое состояние, набегая на режущую поверхность, создают удары и вибрацию резца, что и может привести к выкрашиванию режущего лезвия. Ввиду того что это при обработке металлов резанием тщательно избегается и не представляет собой практических режимов резания, мы такое затупление резца из своего рассмотрения выпускаем.

При практических режимах резания выкрашивания режущего лезвия резца не должно наблюдаться. Износ (или затупление) резца происходит постепенно.

Резец может истираться частицами металла, уходящими в стружку, и деформироваться под действием составляющих давлений резания (главным образом под действием сил давления от скоростного напора). Судя по тому, какой из этих факторов имеет преобладающее значение, мы можем износ резца считать или вследствие истирания (механический) или же вследствие деформации режущей поверхности. Этот вид затупления можно иначе назвать **тепловым износом.** Промежуточным износом — и наиболее часто встречающимся — будет одновременно и тепловой и механический, иначе говоря, **смешанный износ.**

Почему мы назвали второй вид затупления тепловым? Для этого необходимо выяснить влияние теплообразования на процесс затупления, иначе говоря, составить себе картину теплового баланса при процессе резания. Теплообразование происходит вследствие внутреннего трения слоев металла в потоке и вследствие трения стружки о переднюю грань резца, причем преобладающее значение имеет первый вид трения. Все тепло, полученное при процессе резания, расходуется следующим образом: часть его уносится стружкой и идет на нагрев изделия, известная часть передается окружающей среде путем лучеиспускания, а значительное количество воспринимается режущей гранью резца и отводится вглубь его. При работе с охлаждением большое количество тепла отводится охлаждающей жидкостью, но, к сожалению, в большинстве случаев мы значительно охлаждаем отходящую стружку (не нуждающуюся в этом) и только в малой степени — режущую грань резца, непосредственно омываемую потоком обрабатываемого металла.

Под влиянием притока тепла тело резца размягчается и теряет свою наружную твердость. Вследствие этого сопротивляемость резца износу и деформации сжатия падает.

Это нарастание притока тепла и поднятие температуры режущего лезвия резца через известный промежуток времени останавливается. Наступает так называемое **тепловое равновесие**. Каждому взятому режиму резания соответствует своя температура режущей грани резца и свое время для достижения соответственного теплового равновесия. В этот момент приток тепла к телу резца равен его расходу. Каждой температуре режущей поверхности соответствует свое падение твердости и сопротивляемости износу. Первенствующую роль в износе резца истирание будет играть до известной температуры, выше которой главное значение имеет деформирование режущей поверхности. При такой **критической температуре**, обусловленной взятыми режимами резания, тело резца настолько размягчается, что на его режущей поверхности появляются остаточные деформации. Набегающим пластическим потоком частицы металла поверхности резца в центре давления начинают выдавливаться. Начинается не только интенсивное образование лунки, но и потеря заданных геометрических форм режущей поверхности. Резец, как говорят, „садится“. С момента достижения критической температуры полное разрушение режущего лезвия происходит чрезвычайно быстро, поэтому практические режимы резания должны давать такое температурное равновесие, в результате которого мы не достигали бы критической температуры.

Выявление основных факторов, влияющих на период резания

Прежде чем приступить к аналитическому выводу интересующей нас зависимости, следует выявить, какие основные факторы влияют на период резания. Начнем с давления резания и постараемся выяснить, влияет ли оно на стойкость режущей поверхности. Нам известно, что современная теория резания металлов не дает функциональной связи между стойкостью и давлением резания. В данный момент нет не только аналитической зависимости между ними, но не удалось как будто уловить на практике изменения стойкости инструмента в зависимости от изменения давления резания. Однако, это далеко не так. При одних и тех же режимах резания, при одних и тех же условиях работы, но при различных обрабатываемых материалах мы получаем различные давления резания и, вероятно, хотя бы отчасти, различное вследствие этого время затупления резца. Поскольку на практике мы всегда имеем дело со смешанным видом затупления, стойкость резца не может не зависеть от давления резания. Механический износ режущей поверхности безусловно характеризуется не только коэфицентом трения, но и нормальным давлением составляющей сопротивления резанию. Чем большее нормальное давление, тем большее истирание.

Поэтому, мы обязаны ввести в нашу зависимость или полное давление резания P, или же удельное давление резания p.

Далее, очевидно имеют значение механические качества материала резца. Чем большей крепостью обладает материал резца, тем большей стойкостью будет обладать его режущая поверхность. Мы можем ввести в нашу зависимость или сопротивление сжатию материала резца $k_{сж}$, или же плотность его ρ. Поэтому, общий вид стойкостной зависимости должен бы быть

$$T=f\left(\frac{k_{сж}}{P}\right).$$

Эта зависимость, хотя и правильна, но дает нам очень мало. Ее нужно раскрыть в более развернутом виде.

Необходимо заметить, что и сопротивление сжатию $k_{сж}$, и плотность ρ резца являются величинами переменными, в зависимости от принятых режимов резания. И сопротивление сжатию и плотность резца уменьшаются при увеличении скорости резания v.

Из рассмотренного выше видно, что на изменение $k_{сж}$ и ρ влияет, главным образом, секундное количество воспринимаемого телом резца тепла H' (или же H — секундное количество выделяемого при процессе резания тепла). Поэтому, если мы введем в нашу зависимость H, то вместе с этим мы должны считать $k_{сж}$ и ρ зависимыми переменными.

Совершённо ясно, что поскольку мы вводим в нашу зависимость H, постольку мы должны исключить из этой зависимости сечение снимаемой стружки F, т. к. это сечение стружки или же раздельно h и s уже должно определять ту или иную величину H. Другими словами, наш фактор H входит в интересующую нас зависимость в качестве независимой переменной.

На первый взгляд покажется, что на таком же основании как и сечение снимаемой стружки, не должна входить в стойкостную зависимость и скорость резания v. Совершенно верно. Скорость резания также изменяет количество тепла, воспринимаемого резцом в единицу времени, но, кроме того, скорость резания оказывает еще и свое особое влияние на период резания. Во-первых, истирание режущей грани резца очевидно зависит от скорости, т. к. с увеличением или уменьшением ее увеличивается или уменьшается работа трения в единицу времени. Далее, скорость влияет на давление резания, а следовательно, опять таки, на механический износ режущей поверхности. Таким образом, скорость резания оказывает влияние на стойкость режущей поверхности дважды непосредственно и один раз косвенно, влияя на изменение H.

В силу этого обстоятельства мы обязаны ввести в стойкостную зависимость также и скорость резания v — в качестве независимой переменной.

Вывод теоретической зависимости

Итак, наша стойкостная зависимость может иметь следующий вид:

$$T=f(\rho_1, \rho_0, v, H).$$

Разрешить эту функциональную зависимость экспериментальным путем нет почти никакой возможности. Для ее разрешения (полного или хотя бы частичного) воспользуемся таким удобным и изящным физико-математическим методом, как анализ размерностей. Удобство этого метода заключается в том, что нам нужно только твердо знать, от каких аргументов зависит наша функция и размерность каждого из этих аргументов.

Зная физическую сущность явления, всегда можно, пользуясь этим методом, найти аналитическую зависимость рассматриваемой функции и, в значительной мере, облегчить экспериментирование, дать основное направление в постановке эксперимента.

Итак, время работы резца до его затупления зависит от следующих факторов:

1) скорость резания v — размерность LT^{-1};
2) кол во тепла в ед. врем. H — размерность ML^2T^{-3};
3) плотность матер. резца ρ_0 — размерность ML^{-3};
4) плотность обрабатыв. матер. ρ_1 — размерность ML^{-3}.

Имея зависимость

$$T = f(v, H, \rho_0, \rho_1), \tag{15}$$

мы всегда ее можем выразить как произведение этих аргументов в некоторых неизвестных степенях, т. е.

$$T = \mathrm{const}\, v^a H^b \rho_0^c \rho_1^d. \tag{16}$$

Проставим размерность каждого из аргументов (уравнения 16):

$$T = \mathrm{const}\,(LT^{-1})^a (ML^2T^{-3})^b (ML^{-3})^c (ML^{-3})^d. \tag{17}$$

Обе части уравнения (17) должны быть равными при любом изменении основных единиц измерения (M, L, T). Из этого следует, что размерность любого из произведений в правой части уравнения (17) должны быть такой же, как и в левой части, т. е.

$$M^0L^0T^1.$$

Приравнивая показатели степеней для M, L и T в правой и левой части уравнения, имеем:

$$\begin{aligned} -a-3b &= 1 \quad \text{для } T \\ a+2b-3c-3d &= 0 \quad \text{„} \quad L \\ b+c+d &= 0 \quad \text{„} \quad M \end{aligned}$$

Для четырех неизвестных имеется всего лишь три уравнения; в таком случае для решения их одно из неизвестных должно остаться произвольным. Пусть это будет показатель степени c плотности режущего материала ρ_0. Разрешая уравнения относительно c, будем иметь:

$$a = -\frac{5}{2}; \quad b = \frac{1}{2}; \quad d = -\frac{1}{2} - c.$$

Следовательно, наше уравнение (16) перепишется так:

$$T = \mathrm{const}\left(\frac{H}{\rho_1 v^5}\right)^{1/2}\left(\frac{\rho_0}{\rho_1}\right)^c. \tag{18}$$

Эту формулу мы можем представить в более удобном для нас виде; для этого умножим и разделим отношение плотностей $\frac{\rho_0}{\rho_1}$ на v^2; в таком случае в числителе мы получим:

$\rho_0 v^2 = k_0$ — величину, характеризующую крепость режущего материала, в знаменателе же —

$\rho_1 v^2 = p$ — удельное давление резания.

Строго говоря, $\rho_1 v^2$ не будет равно полному удельному давлению резания (равно как и $\rho_0 v^2$ не равно k_0); однако же размерность этого произведения равна размерности удельного давления резания. Благодаря подобной подстановке у нас должна измениться по величине лишь постоянная const.

После соответствующей подстановки наша формула примет следующий вид:

$$T = \mathrm{const}\sqrt{\frac{H}{pv^3}}\left(\frac{k_0}{p}\right)^c. \tag{19}$$

Так как значение показателя степени c ничем не ограничено, мы можем наше уравнение представить так:

$$T = \text{const} \sqrt{\frac{H}{pv^3}} f\left(\frac{k_0}{p}\right). \qquad (20)$$

Точно к такому же результату мы пришли бы, если бы сразу предположили, что стойкость зависит от удельного давления резания, сопротивления сжатию режущего материала, скорости резания и количества тепла в единицу времени H, т. е. если бы мы предполагали зависимость:

$$T = f(p,\ k_0,\ v,\ H).$$

Неудобство формулы (20) заключается в том, что подкоренное количество содержит в себе зависимую переменную H (в свою очередь зависящую от многих аргументов). С другой стороны недостатком формулы (20) является отсутствие в ней таких независимых переменных, как глубина резания h и подача s, характеризующих режим резания. По этой причине следует найти зависимость между H и факторами, влияющими на величину H, и сделать соответствующую подстановку в уравнение (20).

Можно считать, что секундное количество тепла, выделяемое при процессе резания H, будет зависеть от следующих величин: от скорости резания v, плотности обрабатываемого материала ρ_1, от его теплоемкости c и теплопроводности r и, наконец, от поперечного сечения снимаемой стружки F или, что то же, от глубины резания h и подачи s.

Разность температур θ, соответствующую режиму резания, в нашу зависимость не вводим, т. к. величина теплоемкости c, теплопроводности r и плотности ρ_1 определяются этой температурой. Иными словами, в нашей зависимости аргументы v, h и s являются независимыми переменными, аргументы же ρ, c и r — зависимыми переменными.

Следовательно, мы можем написать, что:

$$H = f(v,\ \rho_1,\ c,\ r,\ h,\ s). \qquad (21)$$

Аналогично предыдущему, эту функциональную зависимость можно представить так:

$$H = \text{const}\, v^a \rho_1^b c^c r^d h^e s^f. \qquad (22)$$

Составим таблицу интересующих нас величин и их размерностей.

Название величины	Символ	Формула размерности
1. Секундное количество тепла	H	ML^2T^{-3}
2. Скорость резания	v	LT^{-1}
3. Плотность обраб. матер . .	ρ_1	ML^{-3}
4. Теплоемкость обраб. матер	c	$ML^{-1}T^{-2}\theta^{-1}$
5. Теплопроводность обраб. матер.	r	$MLT^{-3}\theta^{-1}$
6. Глубина резания	h	L^1
7. Подача	s	L^1

Подставим размерности величин в уравнение (22), после чего можем выписать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} b + c + d &= 1 \quad \text{для } M \\ a - 3b - c + d + e + f &= 2 \quad \text{„ } L \\ -a - 2c - 3d &= -3 \quad \text{„ } T \\ -c - f &= 0 \quad \text{„ } \theta \end{aligned}$$

Для четырех уравнений имеем шесть неизвестных. Поэтому у нас будет два произвольных показателя степени для двух каких-либо из аргументов, входящих в уравнение (22).

Наиболее удобно выбрать такими произвольными показателями степени d и e. Разрешая написанные выше уравнения относительно d и e, получим:

$$a = 3 - d;\ b = 1;\ c = -d;\ f = 2 - d - e,$$

после чего уравнение (22) примет следующий вид:

$$H = \text{const}\, \rho_1 v^3 s^2 \left(\frac{r}{cvs}\right)^d \left(\frac{h}{s}\right)^e. \tag{23}$$

Просматривая уравнение (23), мы можем сказать, что вместо квадрата подачи мы можем написать равное ей по размерности поперечное сечение снимаемой стружки. Разница будет лишь в величине постоянного const (ибо $F = \text{const}\, s^2$). Далее мы замечаем, что отношение глубины резания h к подаче s равно удлинению стружки.

Займемся теперь безразмерным коэфициентом $\alpha = \frac{r}{cvs}$. Во-первых, его можно переписать следующим образом:

$$\alpha = \text{const}\, \frac{r}{cv\sqrt{F}}.$$

Во-вторых, можно заметить, что размерность $\frac{r}{c}$ равна размерности $\frac{\mu}{\rho}$, т. е. равна размерности отношения вязкости обрабатываемого материала к его плотности. Следовательно, можно написать, что

$$\alpha = \text{const}'\, \frac{\mu}{\rho v \sqrt{F}} = \frac{\text{const}}{R_c},$$

т. е. мы получили, что наш безразмерный коэфициент есть ни что иное, как так называемое число, обратное числу Рейнольдса, характеризующее собою вид потока. После всего этого наше уравнение (23) можно переписать следующим образом:

$$H = \text{const}\, \rho_1 v^3 F \left(\frac{1}{R_c}\right)^d (\lambda)^e \tag{24}$$

или (ввиду произвольности наших степеней d и e) окончательно запишем:

$$H = \text{const}\, \rho_1 v^3 F f(R_c,\ \lambda). \tag{25}$$

Таким образом, после соответствующей подстановки уравнение (20) примет следующий вид:

$$T = \text{const}\, \frac{\sqrt{F}}{v} f\left(\frac{k_0}{p},\ R_c, \lambda\right). \tag{26}$$

Принимая во внимание то обстоятельство, что даже при большом изменении скорости резания удельное давление резания изменяется сравнительно незначительно, на первый взгляд может показаться, что формула (26) дает результаты, далекие от действительности. Более того, может показаться, что выведенная нами формула просто приводит к абсурду, так как, судя по ее виду, можно заключить, будто бы с увеличением поперечного сечения снимаемой стружки стойкость режущей поверхности инструмента возрастает (пропорционально квадратному корню из взятого сечения стружки). Однако, это только лишь кажущееся противоречие. Выяснением этого вопроса мы займемся далее, когда дадим анализ выведенным зависимостям.

Второй вариант вывода стойкостной зависимости

Время затупления T режущей поверхности резца зависит от: удельного давления резания p, сопротивления деформации сжатия резца $k_{сж}$, скорости резания v и поперечного сечения снимаемой стружки F, определяемой взятыми глубиной резания h и подачей s, т. е.

$$T=f(p,\ k_{сж},\ v,\ h,\ s). \tag{15'}$$

Здесь у нас независимыми переменными будут v, h и s, остальные же аргументы p и $k_{сж}$ являются зависимыми переменными. Если практически удельное давление резания p очень мало зависит от скорости резания v, то его зависимость от отношения глубины резания к подаче очень велика.

Как и прежде представим нашу функцию, как произведение аргументов в некоторых произвольных степенях:

$$T=\mathrm{const}\,p^a\cdot k_{сж}^b\cdot v_c\cdot h^d\cdot s^f. \tag{16'}$$

Подставляя в это уравнение размерности соответствующих величин, можем написать следующую систему уравнений:

$$\begin{gathered}2a+2b+c=-1\\ a+b=0\\ -a-b+c+d+f=0\end{gathered}$$

Разрешая эти уравнения относительно произвольных показателей степени a и f, получим: $b=-a$; $c=-1$; $d=1-f$.

После подстановки наше уравнение примет вид:

$$T=\mathrm{const}\,\frac{h}{v}\left(\frac{s}{h}\right)^f\left(\frac{k_{сж}}{p}\right)^a. \tag{17'}$$

Заменяя глубину резания h на сечение стружки F ($h=\mathrm{const}\,F$) и отношение $\frac{h}{s}=\lambda$, получим

$$T=\mathrm{const}\,\frac{\sqrt{F}}{v}f\left(\frac{k_{сж}}{p},\ \lambda\right). \tag{18'}$$

В связи с изменением режимов резания получается то или иное тепловое равновесие. Иными словами, $k_{сж}$ есть величина переменная. С другой же стороны, изменение режимов резания и температуры влечет за собой изменение плотности ρ обрабатываемого материала и его вязкости μ. Поэтому, вместо того, чтобы вводить в нашу зависимость температуру при процессе резания θ, мы можем ввести независимые переменные v, ρ_1, μ и сечение стружки F. Кроме того, мы должны будем ввести в нашу зависимость величину k_0, характеризующую сопротивление материала резца деформации сжатия до момента резания. Этот аргумент войдет в нашу функцию как независимая переменная. Итак, сопротивление сжатию $k_{сж}$ равно:

$$k_{сж}=f(k_0,\ v,\ F,\ \mu,\ \rho_1) \tag{19'}$$

или, иначе:

$$k_{сж}=\mathrm{const}\,k_0^a v^b F^c \mu^d \rho_1^e. \tag{20'}$$

В результате подстановки в это уравнение размерностей соответствующих величин, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{gathered}a+d+e=1\\ -a+b+2c-d-3e=-1\\ -2a-b-d=-2\end{gathered}$$

Разрешая эти уравнения относительно независимых переменных a и d, получим:

$$b=2-2a-d;\ c=-\frac{d}{2};\ e=1-a-d.$$

После соответствующей подстановки и преобразований будем иметь:

$$k_{сж}=\mathrm{const}\,\rho_1 v^2\left(\frac{k}{\rho_1 v^2}\right)^a\left(\frac{\mu}{\rho_1 v\sqrt{F}}\right)^d. \tag{21'}$$

Это уравнение можно переписать следующим образом:

$$k_{\text{сж}} = \text{const}\, \rho_1 v^2 \left(\frac{k_0}{\rho_1 v^2}\right)^a f(R_c). \tag{22'}$$

Вставив в уравнение (18′) полученное значение для $k_{\text{сж}}$ из уравнения (20′), получим:

$$T = \text{const}\, \frac{\sqrt{F}}{v} \left[\frac{\rho_1 v^2}{p} \left(\frac{k_0}{\rho_1 v^2}\right)^a\right]^{a_1} f(R_c,\ \lambda). \tag{23'}$$

Так как размерность $\rho_1 v^2$ и размерность удельного давления резания одна и та же, то уравнение (23′) можно записать в следующем виде:

$$T = \text{const}\, \frac{\sqrt{F}}{v} f\left(\frac{k_0}{p},\ R_c,\ \lambda\right). \tag{24'}$$

Таким образом, мы пришли другим путем к ранее выведенным результатам.

Приведение стойкостной зависимости к практическому виду

Полученная нами формула (26) является своего рода универсальной, справедливой для всех видов обрабатываемого материала и материала режущего инструмента и для любых режимов резания, для любых скоростей — от чрезвычайно малых и до сверх-скоростей. Однако, для практического пользования эта формула неудобна. Поэтому необходимо произвести целый ряд преобразований и упрощений. В первую очередь необходимо будет дать развернутый вид числу Рейнольдса (или числу, аналогичному числу Рейнольдса). Перепишем нашу формулу (26) следующим образом:

$$T = \text{const}\, \frac{\sqrt{F}}{v} \left(\frac{1}{v\sqrt{F}}\right)^a \left(\frac{r}{c}\right)^a f\left(\frac{k_0}{p},\ \lambda\right). \tag{27}$$

После соответствующего преобразования уравнение (27) будет иметь вид:

$$T = \frac{\text{const}}{v^{a+1} \sqrt{F}^{\frac{a}{a-1}}} \left(\frac{r}{c}\right)^a f\left(\frac{k_0}{p},\ \lambda\right). \tag{28}$$

Для другого режима резания, характеризуемого другой скоростью резания v_1 и прочими равными условиями, время затупления T_1 режущей поверхности будет равно

$$T_1 = \frac{\text{const}}{v_1^{a+1} \sqrt{F}^{\frac{a}{a-1}}} \left(\frac{r_1}{c_1}\right)^a f\left(\frac{k_0}{p},\ \lambda\right), \tag{29}$$

ибо при изменении скорости резания v_1 меняются и зависимые переменные r, c и p. Возьмем отношение $\frac{T_1}{T}$. После простых преобразований это отношение будет иметь следующий вид:

$$\frac{T_1}{T} = \left(\frac{v}{v_1}\right)^{a+1} \left(\frac{r_1}{r} \frac{c}{c_1}\right)^a f\left(\frac{p}{p_1}\right). \tag{30}$$

Определим из уравнения (30) стойкость режущей поверхности при скорости резания v_1:

$$T_1 = T \left(\frac{v}{v_1}\right)^{a+1} \left(\frac{r_1}{r} \frac{c}{c_1}\right)^a f\left(\frac{p}{p_1}\right). \tag{31}$$

Зная стойкость резца T при определенных режимах резания для скорости резания v, мы по формуле (31) можем определить стойкость резца T_1 для любой другой скорости v_1, но для тех же прочих параметров резания.

Почти для всех употребляющихся в настоящее время на практике скоростей резания можно считать, что в уравнении (31)

$$\frac{p}{p_1} \cong 1;$$

поэтому уравнение (31) можно переписать:

$$T_1 = T\left(\frac{v}{v_1}\right)^{a+1}\left(\frac{r_1}{r}\frac{c}{c_1}\right)^a. \tag{32}$$

Наконец, если мы дальше сузим диапазон скоростей резания (допустим, разобьем их по видам работ: обдирочные, получистовые, чистовые), то с достаточной для практических целей степенью точности можем посчитать, что

$$\frac{r}{r_1} \cong 1 \qquad \frac{c}{c_1} \cong 1; \quad \text{примем } a + 1 = n.$$

После соответствующей подстановки уравнение (31) примет следующий окончательный вид:

$$T_1 = T\left(\frac{v}{v_1}\right)^n. \tag{31}$$

Это и есть общий вид зависимости стойкости режущей поверхности и скорости резания v, так называемый закон $T - v$, известный в искусстве обработки металлов резанием со времен Тэйлора и до наших дней.

Следует обратить особое внимание на то, что формула (33) или, иначе, обычный вид зависимости $T - v$ — есть частный случай формулы (31). Только после целого ряда допущений и ограничений мы приходим к известному нам виду стойкостной зависимости. Именно, вследствие подобных невольных упрощений, — точнее говоря, не приняв во внимание физической сущности затупления режущей поверхности, — различные многочисленные исследователи получили различные данные для периода резания, для одного и того же обрабатываемого материала и материала режущего инструмента и как будто для одних и тех же условий работы.

Распространяя закон $T - v$ в его настоящем виде „на все случаи жизни", мы совершаем грубую ошибку, ошибку диалектического порядка. Если наша функция f зависит от ряда зависимых и независимых аргументов, причем некоторые из зависимых аргументов являются в свою очередь функцией f_1 одного или нескольких независимых аргументов функции f, то при некоторых **количественных** изменениях этих независимых аргументов может получиться **качественное изменение основной функции** f.

Так, для нашего случая, при очень больших скоростях резания, иначе говоря, при так называемом критическом числе Рейнольдса, должно наблюдаться резкое падение (уменьшение) коэфициента лобового сопротивления, а поэтому и полного давления резания и удельного давления резания p. Отсюда, согласно формулы (31), видно, что, начиная с некоторых значений скорости резания, стойкость режущей поверхности будет повышаться. Опыты Саломона с фрезерованием подтверждают это.

Вообще говоря, судя по виду нашей формулы (31), мы можем предполагать три скачкообразных изменения нашей функции, в зависимости от изменения лишь одной только скорости резания v. Первое резкое изменение функции, как уже мы говорили выше, будет при резком изменении удельного давления p, второе может быть при скачкообразном изменении теплоемкости c и, наконец, третье — при соответственном изменении теплопроводности r.

При каких-то иных изменениях скоростей резания, при которых мы не достигаем ни одной из трех критических точек, зависимые переменные p, c и r оказывают непрерывное влияние на нашу функцию, в то же время резко не нарушая динамической ее закономерности.

Вывод нашей стойкостной зависимости остается справедливым для любого обрабатываемого материала и материала режущего инструмента, ибо в этом случае в формуле будут фигурировать только иные числовые значения наших аргументов k_0, p, c и r. Отсюда мы можем для себя сделать весьма важный вывод, а именно, что

$$a = \text{const}.$$

Для всех видов обрабатываемого материала и материала режущего инструмента степенной показатель стойкостной зависимости есть величина постоянная. Имеем ли мы дело с обычной углеродистой машиноподелочной сталью (ст. „5") или же легированной хромоникелевой (ХЗН), обрабатываем ли чугун или же алюминиевый сплав, режем ли мы углеродистым быстрорежущим резцом или же резцом из твердого сплава,— степенной показатель a стойкостной зависимости будет один и тот же, характер изменения стойкости будет неизменным. Такое утверждение на первый взгляд может показаться неверным, ибо оно как будто противоречит данным практики.

Первые исследования и отыскание стойкостной зависимости для резцов из углеродистой и быстрорежущей стали произведены были, как известно, Тэйлором. Им найдена следующая стойкостная зависимость при обработке железа и стали быстрорежущими резцами:

$$T_1 = T\left(\frac{v}{v_1}\right)^8,$$

т. е. период резания обратно пропорционален отношению скоростей резания в восьмой степени. Им же для случая работы углеродистыми резцами дана зависимость:

$$T_1 = T\left(\frac{v}{v_1}\right)^5.$$

Профессором Риппером для периодов резания в пределах от 10 до 60 минут дается для разных сортов стали такая стойкостная зависимость:

$$T_1 = T\left(\frac{v}{v_1}\right)^{12}.$$

В таблице 1 приводим данные ряда исследователей стойкостной зависимости $v = \frac{\text{const}}{T^x}$ *).

Таблица 1

Автор исследования	Наименование обрабатываем. материала	Матер. резца	x	Примечание
Тэйлор	Сталь	б/р. ст.	1/8	Для обдирочных работ
„	„	углер. ст.	1/5	
По америк. Комит. Стандарт	„	б/р. ст.	1/7	„
Риппер	„	„	1/12	„
Валликс (и Крекелер) .	„	„	1/9	„
Валликс	Чугун	„	1/9	„
Мейерсберг	Сталь	„	1/6	„
По Гипромашу ...	Для всех применяемых материалов	„	1/6—1/9	„
Беспрозванный	Ст. 1120	„	0,062	Для чистовых работ
„	„ 5140	„	0,064	„
„	„ 1040	„	0,069	„
„	„ 5120	„	0,079	„
„	„ 3120	„	0,115	„
Червяков	Для легированных сталей	„	0,1	„

*) const и показатель степени при T зависят от: 1) обрабатыв. материала и его физических свойств, 2) качества инструментальной стали резца, 3) режима резания (глубина, подача), 4) геометрии резца (φ, φ_1, δ, r), 5) рода охлаждающе-смазочной жидкости, 6) выбранного критерия затупления.

В таблице 2 дается стойкостная зависимость по формуле

$$v_{60} = \frac{\text{const}}{h^a s^б \sigma_б^c} \frac{q^x}{\sin^d \varphi},$$

где: q — поперечное сечение резца,
h, s — соответственно глубина резания и подача,
$\sigma_б$ — врем. сопрот. разр. обрабатыв. материала,
φ — угол в плане.

Таблица 2

Автор	Наименов. обрабат. материала	Матер. резца	Режимы	Формула	Примечание
Тэйлор	Углерод. сталь	б/р. резец	$h = 2—12$ мм $s = 0{,}5—3$ „	$v_{60} = \frac{40750\, q^{0,134}}{h^{0,22}\, s^{0,67}\, \sigma_b^2 \sin^{0,45}\varphi}$	Резец с прямолинейн. режущим лезвием
Демстер-Смит	„	„	$h = 2—7$ мм $s = 0{,}8—3$ „	$v_{60} = \frac{107000\, q^{0,08}}{h^{0,24}\, s^{0,56}\, \sigma^{1,54}\, \varphi^{0,6}}$	φ — подставлять в градусах
Валликс и Крекелер	Легиров. и никел. и хромоник. ст.	„	$h = 2—4$ мм $s = 0{,}56—3$	$v_{60} = \frac{3344\, q^{0,135}}{h^{0,25} s^{0,5}\, \sigma^{1,3} \sin^{0,25}\varphi}$	
Валликс	Чугун различн. тверд.	„	—	$v_{60} = \frac{178500}{h^{0,25}\, s^{0,45} H_Б^{1,7} \sin^{0,2}\varphi}$	$H_Б$ — твердость по Бринеллю

Данные таблицы 2 относятся к работе резца без охлаждения.

Интересно отметить, что Тэйлор считал для чугуна такую же величину степенного показателя стойкостной зависимости, как для железа и стали. Проф. Рудник, на основании анализа ряда опытных данных, полученных различными исследователями, приходит к заключению, что степенной показатель стойкостной зависимости, характеризующий собою закон изменения периода резания, уменьшается по мере увеличения периода резания. Однако, он считает, что для периода резания от 10 до 90 минут величина этого показателя степени есть величина постоянная для данного рода обрабатываемого материала и материала резца, а именно *):

а) Для углерод. резцов при обраб. железа и стали $n = 5$
б) „ быстрореж. „ „ „ железа, машиноподелоч. углерод. стали и чугуна . . . . $n = 8$
в) для б/р. резцов при обраб. специальн. стали . . $n = 6$
г) для резцов из хромо-кобальт. (стеллит) и вольфрамокарбидных („Видиа“) сплавов при обработке железа и стали . . . . $n = 6$

Каким же образом согласовать формулу (31) с данными практики? Совершенно очевидно, что в том случае, если по каким-либо причинам (то ли благодаря сознательному пренебрежению влиянием отношения теплоемкостей и теплопроводностей на период резания, то ли просто не уловив этих факторов) мы в формуле (31) оставим только отношение скоростей в какой-то степени, — то в этом случае для того, чтобы сохранить математический вид периода резания мы вынуждены будем обязательно получать степенной показатель переменным. Только при таком условии, сохранив обычный математический вид закона $T — v$, мы будем в состоянии дать математическую обработку производимых нами экспериментов и практических наблюдений. Но вместе с тем (и это нужно твердо помнить) мы, вместо рассмотрения общего целого, имеем теперь дело с частями этого целого. Поэтому нужно быть чрезвычайно осторожным в том слу-

*) Рудник, „Теория резания металлов“, стр. 117.

чае, когда является необходимость в обобщении результатов ряда наблюдений и закономерностей.

Для того чтобы перейти от формулы (31) к формуле (33), другими словами, для того чтобы перейти от общего к частному случаю, мы должны были сделать допущение, что

$$\frac{p}{p_1}=1; \quad \frac{r}{r_1}=1; \quad \frac{c}{c_1}=1;$$

но ведь это неверно: данные отношения никогда не равны единице. Поэтому даже для небольшого диапазона скоростей резания добавочные зависимые переменные стойкостной зависимости как бы изменяют показатель степени n, если бы мы хотели выражать эту зависимость в виде:

$$T_1=T\left(\frac{v}{v_1}\right)^n.$$

Для тех материалов, у которых с изменением температуры, другими словами, скорости резания, теплоемкость и теплопроводность изменяются сильно, показатель степени n будет изменяться значительно. Точно так же для одного и того же обрабатываемого материала, по мере увеличения скоростей резания, показатель степени n формулы (33) должен значительно изменяться, причем до известного диапазона скоростей этот показатель может увеличиваться, а начиная с некоторой скорости резания падать. Третье зависимое переменное, а именно удельное давление резания, начинает оказывать более или менее заметное влияние на изменение степенного показателя n стойкостной зависимости лишь при значительно больших скоростях резания, чем аргументы c и r.

Припоминая вывод формул (31) и (33), мы можем сказать, что непременно должно соблюдаться одно лишь единственное условие, при котором эти формулы не дадут результатов, противоречащих здравому смыслу и практической действительности, а именно

$$a>1,$$

т. е. **степенной показатель стойкостной зависимости должен быть всегда больше единицы.**

Это ясно видно из уравнения (27). Если бы показатель степени a был меньше единицы, то тогда следовало бы, что при увеличении поперечного сечения снимаемой стружки и постоянном удлинении λ и скорости резания v, стойкость режущей поверхности инструмента увеличивается, что, конечно, абсурдно. Точно так же при $a=1$ выходило бы, что увеличение поперечного сечения снимаемой стружки не оказывает никакого влияния на период резания инструмента, что также абсурдно.

Уравнение скорости резания

Преобразуя общий вид уравнения периода резания инструмента (формула 26), мы получаем уже известную нам формулу (28):

$$T=\frac{\text{const}}{v^{a+1}\sqrt[\frac{2}{a-1}]{F}}\left(\frac{r}{c}\right)^a f\left(\frac{k_0}{p}, \lambda\right).$$

Из этого уравнения определяем скорость резания v:

$$v=\frac{\text{const}}{\sqrt[2\frac{a+1}{a-1}]{F}}\left(\frac{r}{c}\right)^{\frac{a}{a+1}}\left(\frac{1}{T}\right)^{\frac{1}{a+1}} f\left(\frac{k_0}{p}, \lambda\right). \quad (34)$$

Обычно периодом резания мы задаемся, т. е. $T = \mathrm{const}$; принимая во внимание, что степенной показатель a есть также величина постоянная, уравнение (34) можно переписать:

$$v = \frac{\mathrm{const}}{\sqrt[2\frac{a+1}{a-1}]{F}} \left(\frac{r}{c}\right)^{\frac{a}{a+1}} f\left(\frac{k_0}{p}, \lambda\right). \tag{35}$$

Для обычно употребляющихся на практике режимов резания удельное давление резания зависит в малой степени от скорости резания и сечения стружки. Поэтому неизвестную функцию $f\left(\frac{k_0}{p}\right)$ из уравнения (35) можно опустить, ибо для каждого данного материла резца $k_0 = \mathrm{const}$. Если же мы примем условие работы с геометрически подобными стружками, т. е. $\lambda = \mathrm{const}$, то формула (35) примет следующий вид:

$$v = \frac{\mathrm{const}\left(\frac{r}{c}\right)^{\frac{a}{a+1}}}{\sqrt[2\frac{a+1}{a-1}]{F}}. \tag{36}$$

Наконец, для небольшого диапазона скоростей изменением теплоемкости и теплопроводности (отношением их) можно пренебречь, т. е. считать, что $\frac{r}{c} = \mathrm{const}$; получим:

$$v = \frac{\mathrm{const}}{\sqrt[m]{F}}. \tag{37}$$

Скорость резания равна какой-то постоянной величине, деленной на корень $m^{\text{той}}$ степени из поперечного сечения снимаемой стружки. Иначе говоря, скорость резания обратно пропорциональна корню $m^{\text{той}}$ степени из поперечного сечения снимаемой стружки.

Необходимо сделать следующие оговорки. Для того, чтобы формула была справедлива, необходимо, чтобы λ равнялась const, иначе говоря, чтобы мы имели дело с геометрически подобными стружками. Кроме того, чтобы величина постоянного коэфициента const была одинаковой для данного обрабатываемого материала, необходимо, чтобы период резания $T = \mathrm{const}$. Для разных периодов резания величина постоянного коэфициента в числителе формулы (37) будет переменной. Формула (34), также как и (26), является справедливой для любого обрабатываемого материала и материала режущего инструмента. Рассуждая аналогично предыдущему, мы можем сказать, что если закономерности наблюдаемых явлений мы хотим придать математический вид согласно формуле (37), то степенной показатель m должен быть переменным и зависеть от:

1) рода обрабатываемого материала и материала резца,
2) соотношения глубины резания подаче (от удлинения λ) или, что то же, ширины стружки к ее толщине,
3) диапазона скоростей резания.

Путем ряда допущений мы пришли к известной в теории резания зависимости $v = f(F)$, поэтому формула $v = \frac{\mathrm{const}}{\sqrt[m]{F}}$, есть частный случай полученной нами формулы (34).

Примерная оценка степенного показателя периода резания

Для того чтобы отыскать величину степенного показателя наших стойкостных зависимостей (а также найти величины постоянных коэфициентов), нужно проделать ряд экспериментальных работ, которые одновременно и должны были бы служить проверкой этих зависимостей. Однако, эту проверку и приблизительную величину степенного показателя a можно иметь на основании уже полученного и накопленного за все время существования науки о резании металлов огромного экспериментального и фактического материала. Для того, чтобы обе наши стойкостные зависимости (формулы 26 и 37) удовлетворяли практическим данным при обычно употребляемых режимах резания, наш степенной показатель должен лежать в пределах

$$a = 4 - 7.$$

Подставим в формулу (32) значение коэфициента a, равное $a = 7$; в таком случае будем иметь:

$$T_1 = T\left(\frac{v}{v_1}\right)^8 \left(\frac{r_1}{r}\frac{c}{c_1}\right)^7. \qquad (38)$$

В некоторых пределах изменение скорости резания для данного обрабатываемого материала — отношение теплоемкости и теплопроводностей $\left(\frac{r}{r_1} \text{ и } \frac{c}{c_1}\right)$ близки к единице и поэтому формула (38) близка к Тэйлоровским данным.

Подставив те же значения коэфициента a в формулу (36), можем написать

$$v = \frac{\text{const}}{\sqrt[2,67]{F}}\left(\frac{r}{c}\right)^{0,875}. \qquad (39)$$

По Тэйлору этот показатель корня равен для стали $m = 2$, для чугуна $m_1 = 2$. По AWF соответственно $m = 2,32$ и $m_1 = 3,9$, по Кроненбергу $m = 2,44$, $m_1 = 3,9$. Вообще же Кроненбергом дается следующая стойкостная зависимость $v = \frac{c_v}{\sqrt[\varepsilon_v]{F}}$, где c_v — скорость резания при сечении снимаемой стружки $F = 1$ мм² — для данного обрабатываемого материала величина постоянная, ε_v есть некоторый показатель корня, зависящий от рода обрабатываемого материала и колеблющийся по Кроненбергу в пределах

$$\varepsilon_v = 1,52—4.$$

По Гиплеру эта стойкостная зависимость выражена $v = \frac{M}{\sqrt[4]{F}}$, где M — величина постоянная для данного обрабатываемого материала.

Нужно отметить, что по этой стойкостной зависимости (при некоторых практических режимах резания) получаются отклонения от действительности в пределах до 100%.

Как видим, показатель корня m в нашей формуле (39) лежит в пределах практических данных. Формула (39) верна для всех видов обрабатываемого материала лишь при условии работы с геометрически подобными сечениями снимаемой стружки и постоянно принятом периоде резания T. В противном случае величина постоянного const должна меняться. Для того или иного обрабатываемого материала степенное отношение теплопроводности к теплоемкости как бы меняет показатель корня периода резания — то увеличивая, то уменьшая его. Так например, если мы возьмем алюминиевое литье или медь, у которых в сильной степени изменяется отношение теплопроводностей при той или иной температуре, то увидим, что это отношение влияет сильно в сторону уменьшения скорости резания, если мы хотим сохранить период резания $T = \text{const}$, т. е. показатель корня m как бы уменьшается. Действительно, подтверждение этому мы находим у Кроненберга, которым для таких материалов, как электрон и желтая медь даны показатели корня стойкостной зависимости соответственно: $m = 1{,}2$ и $m = 1{,}65$ (для стального литья $m = 2{,}65$).

Если мы в логарифмической системе координат изобразили бы раздельно нашу стойкостную зависимость в виде:

$$v = f(F) \text{ и } \frac{r}{c} = f(v),$$

то получили бы для всех видов обрабатываемого материала прямую AB (см. рис. 1), уравнение которой $v = \frac{\text{const}}{\sqrt[2,67]{F}}$ и для данного обрабатываемого материала прямую BC и B_1C_1, в зависимости от характера изменения теплоемкостей и теплопроводностей этого материала при различных температурах (иными словами, при различных скоростях резания).

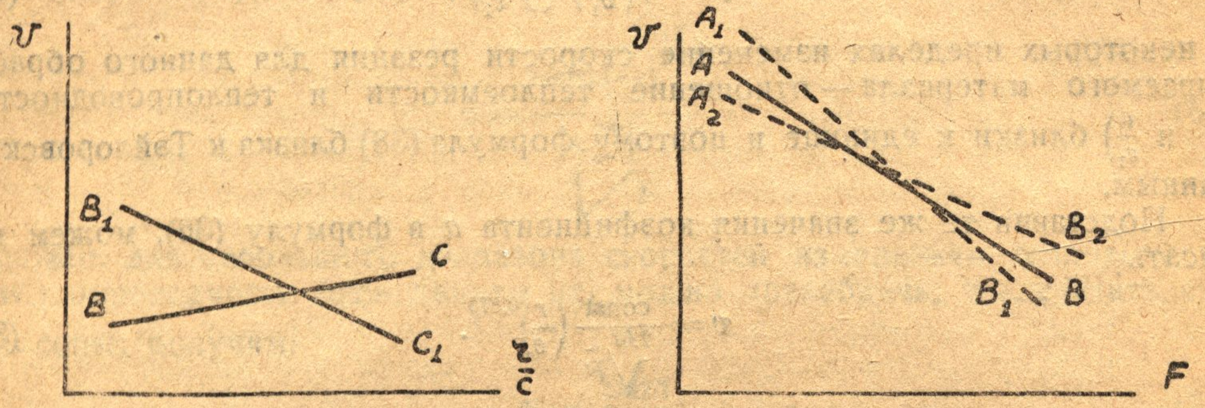

Рис. 1

Истинная графическая зависимость выражалась бы прямой A_1B_1 или прямой A_2B_2. В результате наша стойкостная зависимость выражается теперь формулой вида:

$T = \frac{\text{const}}{\sqrt[m]{F}}$, где показатель корня $m > 2{,}67$ или $m < 2{,}67$ (в зависимости от обрабатываемого материала).

Все, о чем мы говорили выше, относится к геометрически подобным сечениям снимаемой стружки. При любом же режиме резания, определяемом принятой глубиной резания и подачей, стойкостная зависимость должна быть выражена формулами (28) и (26), в которых фигурирует отношение глубины резания h к подаче s.

Имеются ли в литературе прямые указания по влиянию отношения глубины резания к подаче на период резания? Такие указания имеются. Например, проф. Рудник, на основании анализа ряда опытных данных, говорит[1]:

„1. При данной величине отношения глубины резания к подаче скорость резания является функцией сечения стружки. С увеличением сечения стружки скорость резания уменьшается, изменяясь для стали и железа обратно пропорционально квадратному корню из сечения стружки, а для чугуна — обратно пропорционально F в степени 0,38.

2. При постоянной величине сечения стружки скорость резания v_n увеличивается с увеличением отношения глубины резания к подаче (или ширины стружки к ее толщине), изменяясь пропорционально корню шестой степени из этого отношения, независимо от рода обрабатываемого материала".

В отличие от так называемой немецкой школы резания, дающей стойкостную зависимость и усилие резания как функцию поперечного сечения

[1] Рудник, „Теория резания металлов", стр. 120.

снимаемой стружки, у нас в СССР принято давать эти зависимости как функцию глубины резания и подачи раздельно, а именно:

$v = \frac{c_v}{s^a h^b}$, где c_v — скорость резания при $h = 1$ мм, $s = 1$ мм, показатели a и b зависят от рода обрабатываемого материала.

Итак, общий вид указанных двух зависимостей следующий:

$$v = f(F) \quad v = f(s, h).$$

Выведенная нами стойкостная зависимость

$$v = f(F, \lambda, r, c)$$

не только удовлетворяет одновременно обоим вышеприведенным зависимостям, но также и дополняет их, отражая в то же время истинное положение вещей на практике.

Особая же ценность полученных нами стойкостных зависимостей заключается в том, что они дают возможность правильно судить о *физической сущности рассматриваемого явления*, а следовательно, дают возможность до некоторой степени и управлять этими явлениями в нужном для нас направлении.

* * *

Для того, чтобы закончить с анализом выведенных нами стойкостных зависимостей, осталось сказать несколько слов о формуле (20):

$$T = \text{const} \sqrt{\frac{H}{pv^3}} f\left(\frac{k_0}{p}\right).$$

По этой формуле получается, что период резания прямо пропорционален корню квадратному из количества выделяемого при процессе резания тепла в единицу времени, обратно пропорционален корню квадратному из произведения удельного давления резания на куб скорости резания v и является функцией $f\left(\frac{k_0}{p}\right)$.

Для сравнительно небольшого диапазона скоростей резания удельное давление резания p можно считать приблизительно величиной постоянной, а так как k_0 материала режущего инструмента является величиной также постоянной, то мы могли бы переписать наше уравнение (19) следующим образом:

$$T = \text{const} \sqrt{\frac{H}{v^3}}. \tag{40}$$

или это можно формулировать так: для данного обрабатываемого материала и материала режущего инструмента, для данного диапазона скорости резания — период резания T прямо пропорционален корню квадратному из секундного количества тепла и обратно пропорционален корню квадратному из куба скорости.

Такое парадоксальное положение, а именно, что с увеличением секундного количества тепла период резания увеличивается, можно объяснить довольно просто. В данном случае период резания зависит от двух аргументов v и H; из них в нашу функцию один аргумент v входит в качестве независимой переменной, другой же H — в качестве зависимого переменного. В самом деле, $H = \phi(v)$; поэтому для данного режима резания само по себе секундное количество тепла H не может увеличиваться или уменьшаться без того, чтобы скорость резания не увеличивалась бы или уменьшалась. Так как скорость резания находится в знаменателе подкоренного выражения и возведена в третью степень, то увеличение H влечет за собой уменьшение периода резания. Другое дело, если бы мы могли увеличить количество секундного тепла H, вне зависимости от скорости резания. В этом случае мы имели бы увеличение периода резания T. Собственно говоря, тут не так важно само по себе увеличение секундного количества тепла при резании H, как то, что при этом уменьшились бы плотность и вязкость обрабатываемого материала. Уменьшение же этих факторов оказало бы свое влияние на снижение сопротивления резанию, а это последнее уменьшило бы механический износ режущей поверхности. Все эти рассуждения были бы верны при условии, что сопротивление $k_{сж}$ материала режущего инструмента (или плотность его ρ) оставалось бы неизменным. Таким образом, если бы мы могли дать интенсивный местный нагрев той части обрабатываемого материала, которая снимется в виде стружки и интенсивное охлаждение поверхности инструмента, мы имели бы выигрыш не только в потребляемой мощности на резание, но и в стойкости самого инструмента. При такой постановке вопроса формула (20) ничего парадоксального в себе не содержит, а удовлетворяет действительному положению вещей: коль скоро секундное количество тепла становится независимой переменной, — период резания T увеличивается при увеличении H.

МЕХАНИЗМ НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ И ВЛИЯНИЕ ЕГО НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ

Пусть на режущую грань резца набегает поток металла, пришедшего в пластическое состояние. На рис. 2 показаны размеры „пораженного" объема или, иначе, вся та область металла впереди резца, где происходят пластические деформации. Поток будет направлен под некоторым углом к вертикали, обуславливаемым углом подъема винтовой линии относительного перемещения резца, а также в некоторой степени действием центробежной силы. Рассмотрим движение какой-либо элементарной струйки нашего потока.

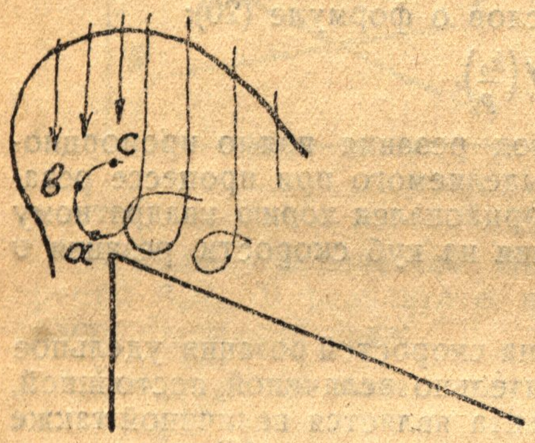

Рис. 2

Соприкасаясь с плоскостью, расположенной под 90° к направлению движения струйки, — последняя растекается по этой плоскости во все стороны с одинаковой затухающей скоростью. Внешний контур нашей струйки будет очерчен поверхностью вращения некоторой образующей, ассимптотически приближающейся к плоскости. В зависимости от скорости струйки и от плотности и вязкости жидкости мы будем иметь растекание, подобное указанному на рис. 3 или же на рис. 4.

При наклонной плоскости мы будем иметь картину, указанную на рис. 5. Чем больше угол наклона плоскости, тем меньше будет растекание струи в сторону возвышения этой плоскости.

Возвращаясь к рис. 2, мы можем сказать, что наибольшее растекание имеют струи, проходящие у носика резца. Далее вниз по режущей грани эти струи будут иметь все большее и большее растекание только в сторону отхода стружки. Струйки же у носика резца могут стремиться пройти за заднюю грань резца или же получить вихревое движение. Поднимаясь вверх, часть струй будет встречаться в своем движении с пограничным потоком, в результате чего должна наступить нулевая скорость струи где-нибудь в точках a, b, или c. Благодаря большой вязкости потока эта струйка осела и прилипла к носику резца.

Одновременно такая же картина происходит в соседних участках режущей грани резца, но в уменьшенных, затухающих размерах. В следующий момент обтекание происходит уже по измененной поверхности и с такой же закономерностью (см. рис. 6).

Следует обратить внимание, что нарост выступает за носик резца в сторону подачи. Вследствие этого область пограничного слоя обязательно должна переноситься вглубь обрабатываемого материала и, следовательно, часть усилия подачи нарост воспринимает на себя.

Набегающим потоком частицы нароста сильно спрессовываются и получают большую твердость, а также в некоторой степени могут втягиваться за заднюю грань резца. В этом случае нарост устойчиво держится на режущей грани.

По мере своего накопления нарост все более и более выступает за носик резца и воспринимает все большую и большую часть усилия подачи. Наконец, это усилие подачи преодолевает силу сцепления нароста с гранью резца и начинается срыв нароста. По мере своего схода нарост

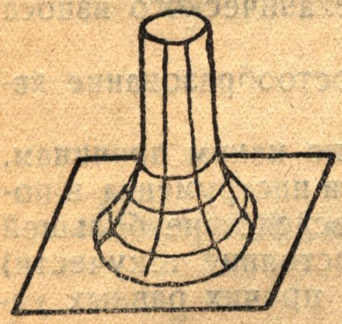

Рис. 3

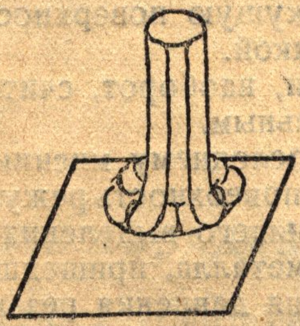

Рис. 4

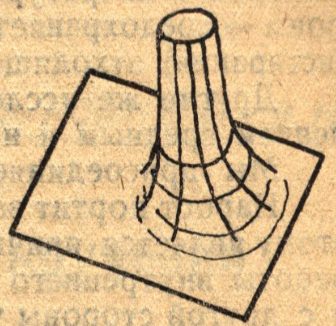

Рис. 5

деформируется, принимает самые различные очертания и сильно портит картину обтекания. Получается, будто поток стремится по подводным камням, по порогам. Естественно, что коэфициент лобового сопротивления c_x сильно возрастает, а следовательно, давление резания и температура также возрастают. После того, как нарост потоком сорван, его образование и накопление начинается снова. Кроме того, что нарост может сорваться полностью, он может срываться частично, как в сторону схода стружки, так и протаскиваться пограничным потоком за заднюю грань резца. Этот унос частиц нароста пограничным потоком будет в особенности сильным для тех условий, когда забрасывания струй нет, а есть только растекание их. В этом случае движение струек основного потока с одной стороны задерживается пограничными потоками и заставляет оседать частицы металла, образуя опять таки нарост, а с другой стороны — по мере накопления нароста пограничный поток его частично смывает.

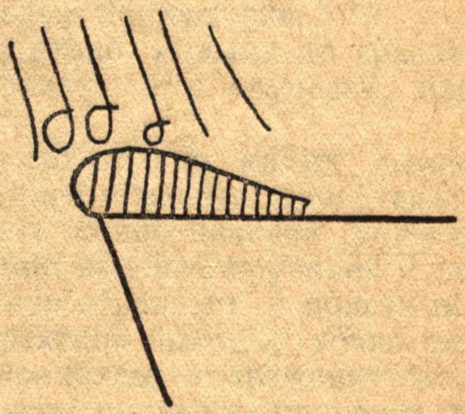

Рис. 6

При очень низких скоростях, близких к так называемому в гидромеханике „ползучему движению“, никакого нароста быть не должно, ибо получается свободное растекание и унос струй за заднюю грань резца. Точно также при повышении скорости резания, иными словами, при увеличении скорости потока, нароста не может быть, т. к. в этом случае забрасывание струй будет таким сильным, что пограничный поток не в состоянии затормозить этого.

Получается полное петлеобразное движение с замедленной, но все же достаточной скоростью, мало отличной от скорости основного потока. Эти частицы металла заброшенной струи, следовательно, полностью включаются в движение основного потока. Иначе говоря, — весь поток завихренный, нет оседания и заторможенных струй, нет и нароста. Коэфициент лобового сопротивления c_x уменьшается и обязательно уменьшается сопротивление резанию. От утствие нароста обязательно также скажется в сторону увеличения чистоты обрабатываемой поверхности.

Таким образом, из рассмотренного следует, что наростообразование является причиной увеличения давления резания, а следовательно, и причиной увеличения потребляемой мощности. Что же касается влияния нароста на изменение периода резания инструмента, то на этот вопрос можно не сразу дать правильный ответ. Этот вопрос остается открытым и в теории резания металлов.

Некоторые исследователи считают нарост благоприятствующим увеличению периода резания (в особенности для тяжелых обдирочных работ), так как по их мнению нарост, с одной стороны, предохраняет режущее лезвие и часть режущей поверхности от пагубного действия довольно высокой температуры, выделяемой в процессе резания, с другой же стороны — предохраняет эту режущую поверхность от механического износа (истирания) отходящей стружкой.

Другие же исследователи, наоборот, считают наростообразование явлением вредным и нежелательным.

Мы присоединяемся к последнему мнению и вот по каким причинам. Нарост портит заданную поверхность режущей части инструмента и поэтому является причиной большего выделения тепла (вследствие большей работы внутреннего трения металла, пришедшего в состояние текучести) и с другой стороны увеличения давления резания. При прочих равных условиях работы нарост понижает критическую температуру, при которой преобладающее значение имеет тепловой износ, т. е. когда происходят значительные пластические деформации самого режущего материала. Или, иначе, при заданном периоде резания T, сечении снимаемой стружки, нарост понижает возможную для данного режима скорость резания. В первую очередь мы должны стремиться всеми возможными мерами к уменьшению теплообразования, возникающего при процессе резания, а затем уже к отводу этого тепла от режущей поверхности инструмента. Поэтому становится ясным, что мы должны всеми мерами бороться с наростообразованием, стремясь к его полной ликвидации или, хотя бы, частичному уменьшению.